



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

VÝROBA BIOMETANU V BIOPLYNOVÝCH STANICÍCH

BIOMETHANE PRODUCTION IN BIOGAS PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Matoušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Jakub Matoušek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba biometanu v bioplynových stanicích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bioplynové stanice (BPS) jsou plně obnovitelnými zdroji energie, které naplňují koncepci tzv. „cirkulární ekonomiky“, jež udržuje funkční a zdravé vztahy mezi přírodou a lidskou společností. BPS zpracovávají odpady přírodního původu a produkují elektřinu, teplo a hnojivé látky, které lze využít jako náhradu za syntetická hnojiva. Investice do nových BPS je nicméně stále poměrně nákladná a neobejde se bez státní podpory. Zavedení nových technologií a postupů by mohlo tuto situaci změnit a přispět k dalšímu rozšíření BPS. Jedním z progresivních postupů je úprava bioplynu na biometan s jeho následným využitím jako paliva nebo vtlačení do sítě se zemním plynem.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Představení provozu bioplynových stanic, současná situace v oboru
- 2) Biometan a jeho perspektiva v Evropě a ČR
- 3) Rešerše a teoretické představení postupů a technologií pro úpravu bioplynu na biometan, základní charakteristika, výhody a nevýhody.
- 4) Zhodnocení a porovnání jednotlivých technologií s ohledem na jejich praktickou využitelnost v prostředí ČR.

Seznam doporučené literatury:

PÖSCHL, Martina, Shane WARD a Philip OWENDE. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. Applied Energy [online]. 2010, 87(11), 3305-3321 [cit. 2019-0-18]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.05.011. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261910001790>

LORA GRANDO, Rafaela, Adelaide Maria DE SOUZA ANTUNE, Fabiana Valéria DA FONSECA, Antoni SÁNCHEZ, Raquel BARRENA a Xavier FONT. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2017, 80, 44-53 [cit. 2019-09-18]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.079. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117307074f>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje výrobě biometanu v bioplynových stanicích. V úvodní části je představen provoz bioplynové stanice, její vstupy, komponenty a produkty. Hlavní část práce se zabývá perspektivou biometanu v České republice a Evropě a progresivními technologiemi pro úpravu bioplynu na biometan. U každé metody upgradu je uveden základní princip, přednosti a nedostatky. Mezi běžné technologie na úrovni komerční připravenosti patří vysokotlaké čištění vodou, fyzikální absorpce organickými rozpouštědly, chemické čištění, adsorpce kolísáním tlaku a membránová separace. Zmíněné způsoby zušlechťování bioplynu jsou zhodnoceny a porovnány s ohledem na jejich praktickou využitelnost v prostředí ČR.

Klíčová slova

obnovitelná energie, biomasa, bioplynová stanice, bioplyn, čištění bioplynu, upgrade bioplynu, biometan

Abstract

This bachelor thesis deals with the production of biomethane in biogas plants. The introductory part presents the operation of the biogas plant, its inputs, components, and products. The main part of the thesis deals with the perspective of biomethane in the Czech Republic and Europe and progressive technologies for the conversion of biogas to biomethane. The basic principle, advantages and disadvantages of each upgrade method are given. Common technologies at the level of commercial readiness include high pressure water scrubbing, organic physical scrubbing, chemical scrubbing process, pressure swing adsorption and membrane separation. The mentioned methods of biogas upgrading are evaluated and compared with regard to their practical applicability in the Czech environment.

Key words

renewable energy, biomass biogas plant, biogas, biogas cleaning, biogas upgrading, biomethane

Bibliografická citace

MATOUŠEK, Jakub. *Výroba biometanu v bioplynových stanicích*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132799>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Marek Vondra.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Mgr. Ing. Marka Vondry, Ph.D. a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Brně dne 20. 5. 2021

Podpis.....

Poděkování

Děkuji Mgr. Ing. Marku Vondrovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, čas, cenné připomínky a rady při zpracování této bakalářské práce. Dále také velmi děkuji společnosti agriKomp Bohemia s.r.o. za podněty vedoucí k příležitosti zabývat se tímto tématem a úspěšnému vypracování této závěrečné práce.

Obsah

1	Úvod	7
2	Bioplynové stanice.....	9
2.1	Biomasa.....	9
2.1.1	Cíleně pěstované plodiny	9
2.1.2	Exkrementy hospodářských zvířat.....	9
2.1.3	Biologicky rozložitelné odpady	9
2.2	Kategorizace BPS	10
2.2.1	Zemědělské	10
2.2.2	Průmyslové	10
2.2.3	Komunální	10
2.3	Hlavní komponenty BPS.....	11
2.3.1	Příjem substrátu	11
2.3.2	Skladování a úprava substrátu	12
2.3.3	Doprava materiálu.....	12
2.3.4	Fermentor.....	12
2.3.5	Míchadla	14
2.3.6	Plynojem	14
2.3.7	Kogenerační jednotka	15
2.3.8	Havarijní hořák	16
2.3.9	Sklad digestátu.....	16
2.4	Bioplyn.....	16
2.4.1	Anaerobní fermentace.....	16
2.5	Digestát	17
2.5.1	Aplikace	17
2.5.2	Znehodnocování půdy.....	18
3	Biometan.....	19
3.1	Výroba biometanu v České republice	20
3.1.1	Energetické centrum recyklace Rapotín	20
3.1.2	Předpokládaný vývoj biometanu	21
3.1.3	Podpora biometanu	22
3.2	Perspektiva biometanu v Evropě	22
3.2.1	Bioodpad.....	24
3.2.2	Dopravní sektor.....	25
3.3	Čištění surového bioplynu	26
3.3.1	Odstranění vlhkosti	26
3.3.2	Odsiřování.....	27

3.4	Technologie pro upgrade bioplynu	29
3.4.1	Technologie HPWS (High pressure water scrubbing).....	30
3.4.2	Technologie OPA (Organic physical absorption).....	31
3.4.3	Technologie AS (Amine scrubbing)	32
3.4.4	Technologie PSA (Pressure swing adsorption)	34
3.4.5	Membránová separace	35
3.4.6	Kryogenní destilace	38
3.4.7	Chemoautotrofní technologie	39
3.4.8	Fotoautotrofní technologie.....	41
3.5	Porovnání komerčních technologií pro upgrade bioplynu.....	43
3.5.1	Ekonomika	43
3.5.2	Přehled výhod a nevýhod.....	46
3.6	Využití biometanu.....	48
3.6.1	Vytápění a plynové kotle	48
3.6.2	Alternativní palivo pro dopravu.....	48
3.6.3	Vstřikování do sítě zemního plynu	49
3.7	Udržitelnost.....	50
4	Závěr	52
	Seznam použité literatury	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	61
	Seznam grafů	62

1 Úvod

Mezi hlavní environmentální problémy dnešní doby se řadí neustále se zvyšující množství vyprodukovaného bioodpadu. Udržitelné nakládání s odpady, zamezení vzniku odpadů a jejich redukce se proto staly téměř v každé zemi jednou z hlavních politických priorit. Tyto priority se také značně podílí na společném úsilí nejen o snižování znečištění životního prostředí a emisí skleníkových plynů, ale i o zmírnění globálního oteplování. Biologicky rozložitelné odpady lze zpracovávat právě v bioplynových stanicích (BPS) za vzniku bioplynu, jenž slouží standardně ke spalování v kogenerační jednotce za účelem kombinované výroby tepelné a elektrické energie. Bioplyn je produktem biologického procesu zvaném anaerobní fermentace, při které dochází k rozkladu biomasy aktivitou mikroorganismů za nepřístupu vzduchu. Zbytek po fermentačním procesu v BPS se nazývá digestát, který nalezne využití v oblasti zemědělství jako kvalitní organické hnojivo [1].

Během posledních 20 let byl zaznamenán velký celosvětový růst výroby bioplynu anaerobní fermentací. Celosvětová produkce obnovitelného plynu se v období 2000–2017 zvýšila ze 78 TWh na 364 TWh, což odpovídá 61 mld. m³ bioplynu ročně. Největším podílem na zmíněné produkci přispěly evropské země, a to až z 54 %. Evropa se svými 18 202 BPS a 12,6 GW instalovanými v roce 2018 je největším světovým producentem elektrické energie z bioplynu. Odhadovaná celosvětová produkce elektřiny z BPS čítá 18,1 GW, z níž 68 % reprezentuje pouze evropská výroba. Tato hodnota však tvoří jen 0,7 % z celosvětově vyráběné elektřiny z obnovitelných zdrojů, která představuje přibližně 2 351 GW [2]. Evropa se stala také světovým lídrem ve výrobě biometanu, který dodává do plynárenské soustavy zemního plynu nebo využívá jako palivo pro automobily. V roce 2015 vyprodukovala okolo 1,23 mld. m³ zeleného plynu za použití svých 459 biometanových stanic. Pro porovnání se v Evropě ve stejném roce vyrobilo celkem 18 mld. m³ bioplynu. V té době 340 výroben poskytlo do plynárenské sítě kolem 1,46 mil. m³ biometanu. Dále v roce 2015 byl biometan o kapacitě 160 mil. m³ spotřebován v dopravním sektoru jako palivo, které bylo k dispozici přibližně na 697 výdejních místech [3].

Na celosvětové úrovni má odvětví bioplynu potenciál přispět ke snížení emisí skleníkových plynů, a to až o 12 %. Dle studie „IEA outlook for biomethane“ z března roku 2020 bude hrát zásadní úlohu bioplyn společně s biometanem v přechodu na nízkouhlíkovou energetiku, a to jak v těžko dekarbonizovatelných průmyslových sférách, tak i v rozvojových částech světa. Biometan je energeticky ekvivalentní fosilnímu plynu a již dnes schopný nákladově konkurovat ostatním nízkouhlíkovým zdrojům, i proto sehraje klíčovou roli na cestě k dekarbonizaci celého energetického sektoru, jenž zahrnuje například oblast dopravy a budov [4]. Evropa plánuje investovat do rozvoje ekologičtější energetické infrastruktury se záměrem podpořit svůj energetický přechod. Biometan, který je eventuálně schopný nahradit stlačený i zkapalněný zemní plyn, má potenciál zmírnit závislost EU na dovozu energie. Od července 2021 do roku 2030, jak stanovuje směrnice 2018/844/ES (REDII), bude bioplyn a biometan započítáván do 32% podílu spotřeby energie EU pocházející z obnovitelných zdrojů a do dílčího cíle 14% energie spotřebované v odvětví dopravy [5].

Vyčištěním bioplynu se získá již zmíněný biometan kvalitativně srovnatelný se zemním plynem, jenž lze vtlačet do plynárenské sítě, anebo využít jako ekologické palivo pro pohon vozidel. Princip čištění provozují již stovky zařízení po celé Evropě. Dále může

zastávat funkci regulátoru a akumulátoru energie. V situaci, kdy začne vznikat v BPS nadprodukce elektrické energie, může být pozastavena činnost kogenerační jednotky, produkovaný bioplyn se může upravit na biometan a následně dodávat do rozvodné sítě zemního plynu. Distribuční plynárenský systém má k dispozici obrovský prostor pro akumulaci, jenž zahrnuje i skladovací zásobníky. Následně lze biometan opětovně použít ke generaci elektřiny určenou pro přímou spotřebu v domácnostech a v různých odvětvích průmyslu, anebo pokud jde o dopravní sektor jako bioCNG vydávané na čerpacích stanicích vzdálených od BPS. Aby byl zajištěn takový provoz, musí se bioplynová stanice vybavit nejen kogenerací, ale i zařízením na úpravu bioplynu [6]. Technologie pomocí níž lze získat biometan jako alternativu fosilního zemního plynu jsou dnes velmi atraktivní v bioenergetickém průmyslu. K dnešnímu dni bylo vyvinuto několik technologií na úrovni komerční dostupnosti a další se nachází v počáteční fázi vývoje [7].

Předmětem této bakalářské práce je poskytnout rešerši z oblasti výroby biometanu v bioplynových stanicích. Úvodní část se zaměřuje na samotné představení bioplynové stanice a jejího provozu. Hlavní část práce se věnuje perspektivě biometanu v České republice (ČR) a Evropě a představení postupů a technologií pro úpravu bioplynu na biometan. V neposlední řadě budou technologie na komerční úrovni zhodnoceny a porovnány s ohledem na jejich praktickou využitelnost v prostředí ČR. Tato bakalářská práce vychází zejména z českých a zahraničních odborných článků.

2 Bioplynové stanice

Bioplynové stanice jsou moderní a ekologická zařízení využívající proces anaerobní fermentace ke zpracování materiálů nebo odpadů organického původu [8]. Koncovými produkty procesu jsou bioplyn, který především slouží k výrobě elektrické energie a tepla v kogenerační jednotce, a digestát, který lze aplikovat jako organické hnojivo [9].

Cílem této kapitoly je poskytnout základní informace o soudobém provozu BPS. Tento přehled tedy shrnuje představitele biomasy a jejich zpracování v různých bioplynových stanicích. Dále popisuje hlavní částí areálu provozovny BPS, samotný proces vzniku bioplynu a zužitkování digestátu.

2.1 Biomasa

Energie biomasy se řadí mezi obnovitelné zdroje energie (OZE). Pojem biomasa označuje veškerou substanci biologického původu, kterou lze získat jako výsledek výrobní činnosti (pěstování rostlin, chov živočichů atd.) nebo prostřednictvím využití odpadů ze zemědělské, lesní a potravinářské výroby, z údržby krajiny, z komunálního hospodářství apod [10].

2.1.1 Cíleně pěstované plodiny

Mezi žádoucí vlastnosti energetických plodin patří nízké náklady na pěstování, robustnost, efektivní využívání živin a vysoká energetická výnosnost. Energetické plodiny lze pěstovat na postižených či méně úrodných půdách, které nelze využít pro potravinářské účely. Vstupní rostlinná surovina musí být silážována z důvodů kontinuálního zásobování fermentoru. To umožňují rostliny ze skupiny pícních plodin (kukuřice, trvalé travní porosty, topinambur, jeteloviny, čirok atd.) [10].

2.1.2 Exkrementy hospodářských zvířat

Měrnou produkcí bioplynu se exkrementy (hnůj, kejda) řadí mezi méně energetické materiály, na druhou stranu vznikají v poměrně velkém množství na jednom místě. Součástí exkrementů jsou mikroorganismy, které se podílejí na rozkladné reakci ve fermentoru a vzniku bioplynu [11].

2.1.3 Biologicky rozložitelné odpady

Jedná se o bioodpady z údržby veřejné zeleně (kromě dřeva), podnikatelských provozů, domácností, restaurací, ze supermarketů apod. Zpracováním bioodpadů v BPS se minimalizuje odkládání a hromadění těchto odpadů na skládkách, kde nemají žádné efektivní využití. Současně se tak podporuje navrácení kvalitní organické hmoty zpět do půdy v podobě digestátu [12].

2.2 Kategorizace BPS

BPS lze rozlišovat několika různými způsoby, jednou z možností je kategorizace na základě druhu vstupní suroviny a dle toho pro ně dále stanovovat různé požadavky v rámci povolovacích procesů [8].

2.2.1 Zemědělské

Zpracovávají suroviny zemědělského původu, které jsou hodnoceny jako nejméně problematické. Nejběžnějšími surovinami jsou statková hnojiva a cíleně pěstované plodiny [8]. Pro vstup mohou použít také odpad z potravinářského a rybářského průmyslu [1]. Od roku 2020 mohou přijímat i bioodpady [13]. Umístění zemědělské BPS bývá obvykle v oblasti již existujících zemědělských provozoven, aby se zde snížil zápach zpracováním a stabilizací statkových hnojiv [8]. Na obr. 1 lze vidět fotografii zemědělské BPS.

2.2.2 Průmyslové

Tento druh BPS zpracovává především rizikové vstupy. Jedná se o odpady z jatek, kaly ze specifických provozů a z čistíren odpadních vod, tuky, masokostní moučku, jateční krev atd. Je nutné dodržovat hygienická pravidla o nakládání s vedlejšími živočišnými produkty, která stanovuje nařízení EP a Rady č. 1774/2002 [8].

2.2.3 Komunální

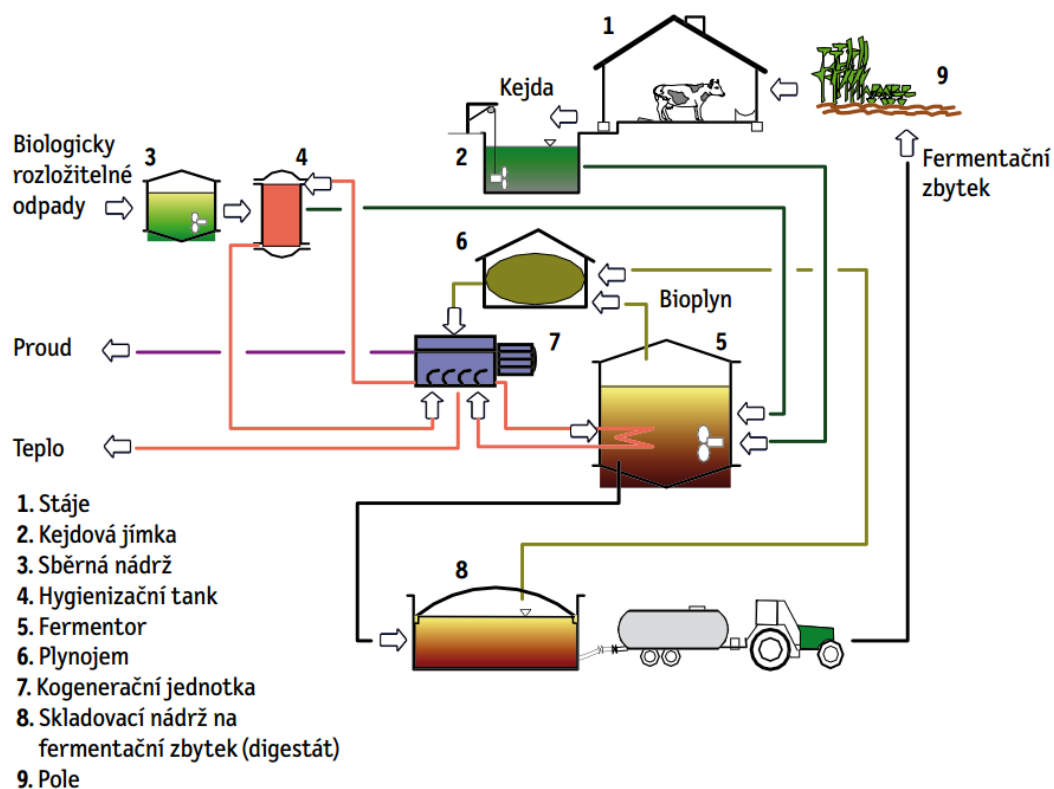
Specializují se na zpracování a energetické využití biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO), a to především z údržby zeleně a gastronomického odpadu (vytříděného odpadu z domácností, restaurací a jídelen) [8].



obr. 1: Typická zemědělská bioplynová stanice [14]

2.3 Hlavní komponenty BPS

Vstupní substráty do jisté míry stanovují, kterými zařízeními bude nutné BPS opatřit. Také typ, velikost a provozní podmínky každé BPS určují, které technologie na úpravu vstupů, skladování a využití bioplynu budou realizovány [1]. Schéma možného stavebního seskupení zemědělské BPS je zobrazeno na obr. 2.



obr. 2: Hlavní komponenty, stavební seskupení a agregáty jednostupňové zemědělské bioplynové stanice s hygienizační jednotkou, upraveno [15]

Z obr. 2 vyplývá komplexní postup procesu v jednostupňové zemědělské BPS, který začíná příjmem substrátu vznikajícího v chovu hospodářských zvířat (1) a jeho následným skladováním v kejdové jímce (2). Současně se provádí shromažďování bioodpadu ve sběrné nádrži (3), tento druh odpadu musí projít předúpravou v hygienizační jednotce (4) před vstupem do fermentoru (5), kde se produkuje samotný bioplyn. Získaná plynná směs se skladuje v plynojemu (6), ze kterého je čerpána do kogenerační jednotky (7) za účelem získání tepelné a elektrické energie. Ve fermentoru se kromě bioplynu vyrábí i digestát, jenž se dočasně uskládňuje v nádrži (8) a poté se aplikuje na zemědělskou půdu (9) [15]. V následujících podkapitolách budou popsány některé komponenty a kroky BPS.

2.3.1 Příjem substrátu

Přísun kvalitního substrátu v dostatečném množství musí probíhat stabilně a nepřetržitě. Pokud provozovatel BPS přijímá cizí substráty, provádí se vizuální vstupní kontrola dodávky a protokolují se všechna vstupní data o substrátu (hmotnost, druh, kvalita, dodavatel atd.). Zvláštní pozornost je věnována vstupům klasifikovaných jako odpad, které by měly splňovat regulační povinnosti i právní a správní předpisy [1].

2.3.2 Skladování a úprava substrátu

Skladování vyrovnává sezónní výkyvy dodávek substrátů. V silech lze skladovat pevné materiály déle než jeden rok, zatímco ve skladovací jímce je možné uchovávat tekuté substráty jen několik dní [1]. Substráty vyžadující hygienizaci musí být skladovány odděleně od zemědělského provozu. Úprava substrátu ovlivňuje průběh fermentace a nabízí značný potenciál pro optimalizaci procesu. Mezi možné úpravy materiálů patří drcení, máčení a macerování, hygienizace, třídění a oddělování příměsí [15].

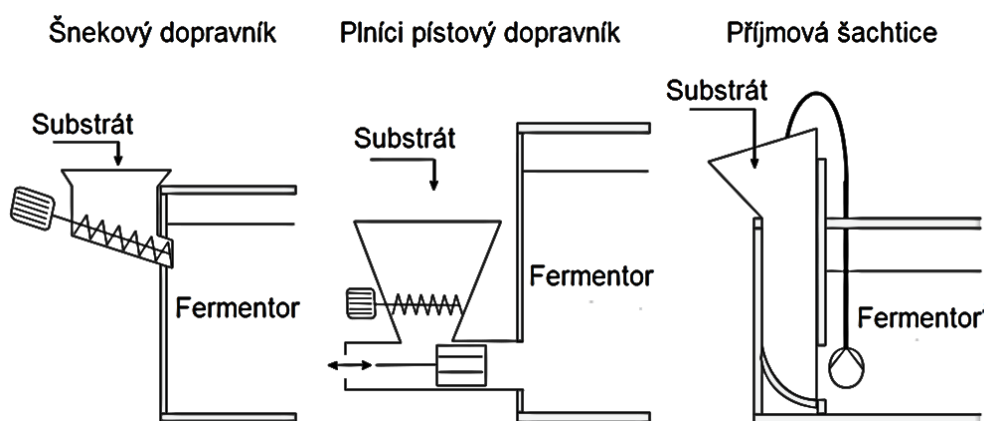
2.3.3 Doprava materiálů

Na dopravu čerpatelných materiálů z nádrže do fermentoru se používají potrubí a následující typy čerpadel [1].

- Odstředivá čerpadla – jsou rotační dynamická čerpadla pro manipulaci převážně se substrátem obsahujícího menší množství sušiny [15].
- Vřetenová čerpadla – jsou určeny pro přepravu hustých látek s vysokým obsahem sušiny [15].
- Membránová čerpadla – mohou přepravovat husté materiály obsahující větší množství cizích příměsí [15].

U potrubí pro biomasu je výhodné udržovat sklon 1–2 % k zajištění případného vypuštění a vyčištění. Průměr potrubí by měl mít 300 mm [1].

Nakladače zajišťují přepravu sypkých materiálů do zásobníku, odtud je substrát dopravován přímo do fermentoru. Dávkování je zajištěno šnekovými dopravníky, plnicími pístovými dopravníky nebo příjmovými šachticemi viz obr. 3 [15].

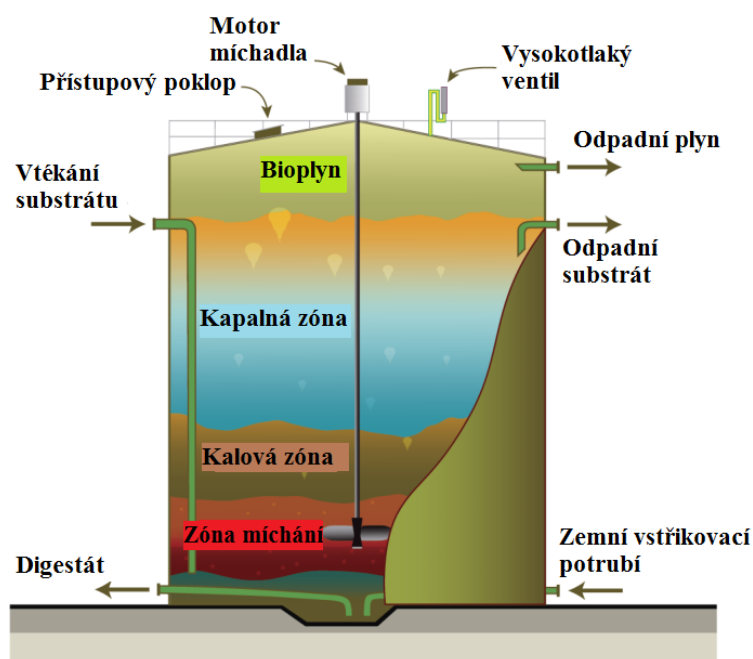


obr. 3: Postupy dávkování sypké biomasy, upraveno [15]

2.3.4 Fermentor

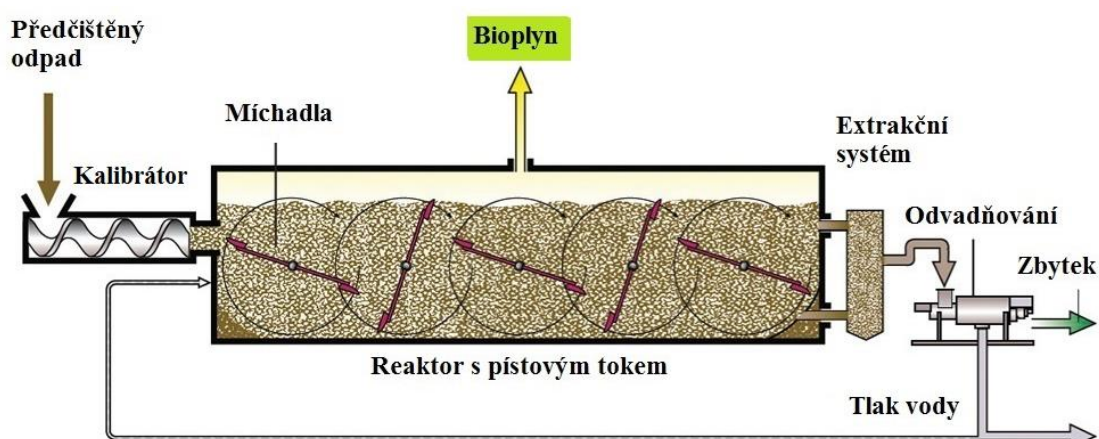
Jádrem každé BPS je fermentor, ve kterém probíhá proces anaerobní fermentace a vznik bioplynu. Z hlediska technického provedení rozlišujeme fermentory vertikální (obr. 4) a horizontální (obr. 5) [15].

- Vertikální fermentory – jsou kulatého průřezu a zhotovují se z železobetonu nebo oceli (konstrukční či nerezové) v místě realizace BPS. Stavba je buď částečně nebo zcela zapuštěna pod povrch terénu, anebo je umístěna nad povrchem země. Objem fermentoru většinou nepřesahuje 6000 m³ z důvodu kvalitnějšího promíchání materiálů. Pro snadnější odstranění usazenin by mělo mít dno nádrže sklon k okrajům či ke středu [15].



obr. 4: Vertikální fermentor, upraveno [16]

- Horizontální fermentory – jsou vyráběny výhradně z konstrukční či nerezové oceli, ale lze použít i železobeton [15]. Obvykle se přepravují do BPS [1]. Objem fermentoru může dosahovat až 800 m³. Nádrže s nuceným posuvem materiálu jsou formovány do hranolu či válce [15].

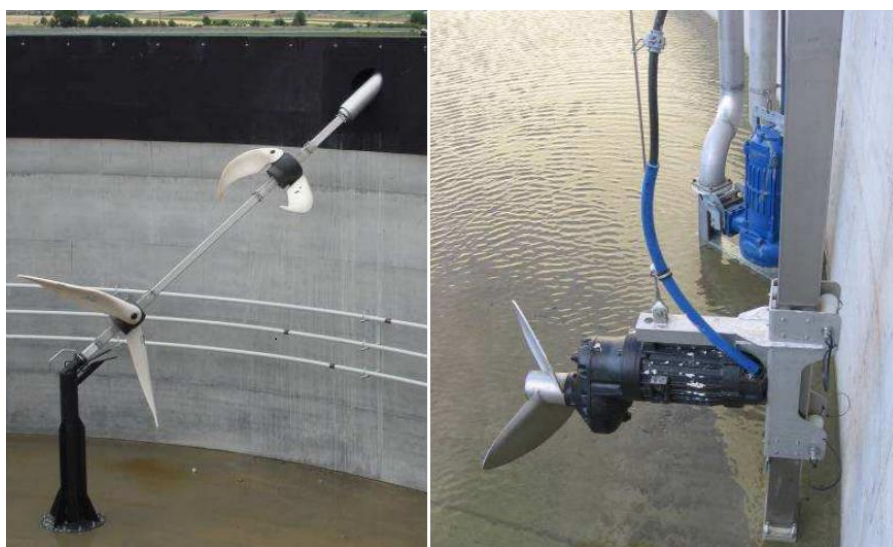


obr. 5: Horizontální fermentor, upraveno [17]

2.3.5 Míchadla

Substrát ve fermentoru musí být účinně promícháván, aby se vytvořily optimální podmínky pro vznik bioplynu, zabránilo vzniku usazenin a nemíchatelné vrstvy u hladiny. Nejčastěji se využívá mechanického promíchávání [1]:

- Ponorná vrtulová míchadla – jsou poháněna bezpřevodovými motory, které jsou opatřeny vodotěsnými pouzdry a povlaky proti korozi. Míchadlo (obr. 6, vpravo) se ponořuje úplně celé do substrátu a jeho polohu je možné nastavit vodorovně, svisle nebo šikmo [1].
- Axiální míchadla – jsou vybavena motory umístěnými mimo fermentor a převodovkami k regulaci otáček. Míchadlo se upevňuje na hřídel instalovanou centrálně na strop nádrže [1].
- Lopátková míchadla – mají motor situován mimo nádrž a osa hřídele může být ve vertikální, horizontální či diagonální poloze (obr. 6, vlevo) [1].



obr. 6: Lopátkové míchadlo (vlevo), ponorné míchadlo (vpravo), upraveno [1]

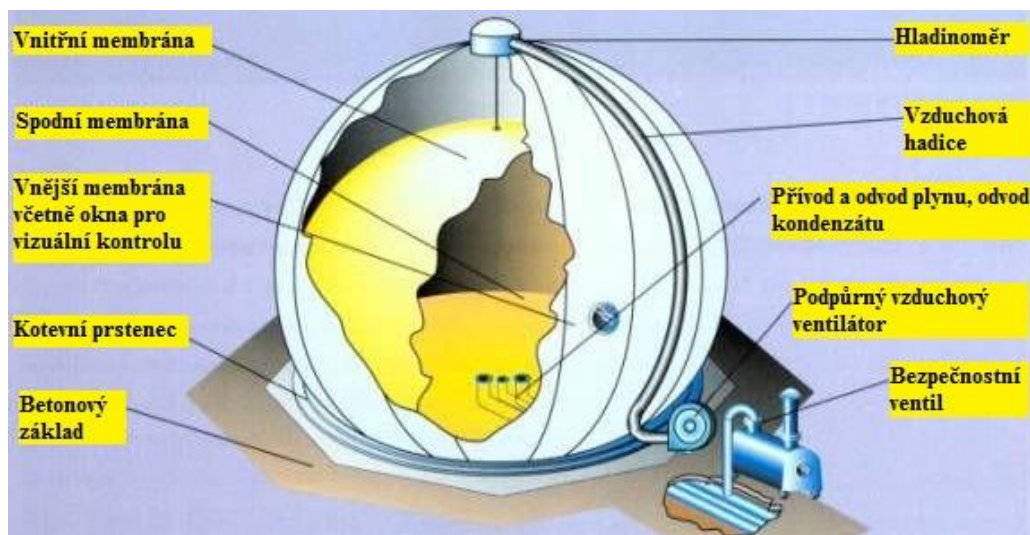
Pneumatické či hydraulické míchání lze použít pouze na řídké substráty, které nevytváří plovoucí vrstvy [15].

2.3.6 Plynojem

V plynovém zásobníku se shromažďuje vyrobený bioplyn a jeho kapacita by měla odpovídat 1/4 až 1/8 denní produkce [15]. Konstrukce zásobníku může být z kovového, plastového nebo gumotextilního materiálu, případně z jejich kombinací [18]. Musí být vybaveny přetlakovými a podtlakovými pojistkami zabraňujícími vysoké změně vnitřního tlaku [15]. Níže obr. 7 vyobrazuje jednotlivé části nízkotlakého plynojemu.

Zásobníky lze klasifikovat dle provozního tlaku na [18]:

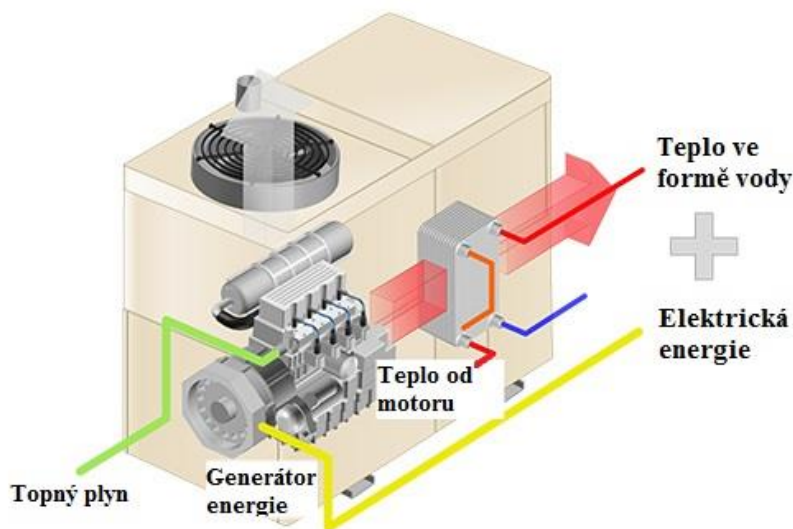
- Nízkotlaké – pod 50 kPa
- Středotlaké – 1 až 2 MPa
- Vysokotlaké – 15 až 35 MPa



obr. 7: Nízkotlaký samostatný plynojem, upraveno [19]

2.3.7 Kogenerační jednotka

Zařízení se skládá z plynového motoru (turbíny) a generátoru elektrického proudu. Kogenerace (obr. 8) označuje současnou výrobu elektrické a tepelné energie. Asi 30 % energie bioplynu se změní na elektřinu, 60 % na teplo a zbytek jsou tepelné ztráty [18].



obr. 8: Kogenerace, upraveno [20]

Základní rozdělení kogeneračních jednotek:

- Se zážehovými plynovými (Ottovy) motory – jako palivo se používá pouze bioplyn. Elektrická účinnost u motorů s vyšším elektrickým výkonem se pohybuje mezi 37–42 % [21].
- Se vznětovými motory se vstřikem zapalovacího oleje – základním palivem je bioplyn a doplňkovým palivem jsou většinou fosilní paliva nebo rostlinné oleje. U tohoto typu motorů se elektrická účinnost pohybuje v rozpětí 40–45 % [21].

2.3.8 Havarijní hořák

Pokud nastane situace, kdy kogenerační jednotka je nouzově odstavena z důvodů poruchy či údržby a plynojem nebude moci pojmout další obsah, přebytečný bioplyn se neškodně spálí v havarijní fléře. Teplotní rozsah spalování musí být udržován mezi 850-1200 °C a doba zdržení nesmí klesnout pod 0,3 sekundy. Tlak na hořáku je třeba zvýšit pomocí dmýchadla na 3-15 kPa. Hořák obsahuje bezpečnostními prvky jako je zachycovač plamene, bezpečnostní ventil a zapalovací systém s detektorem plamene [1].

2.3.9 Sklad digestátu

Digestát (fermentační zbytek) je dočasně skladován v nádržích mimo areál BPS např. v polích, kde je následně aplikován. Skladovací kapacita by měla být na 6 až 9 měsíců z důvodu efektivního využití digestátu jako hnojiva. Možné jsou úniky metanu a dalších látek do ovzduší, tomu by se dalo předejít pokrytím nádrže plynotěsným krytem [1].

2.4 Bioplyn

Výsledkem anaerobní fermentace je směsice plynů a fermentační zbytek organické hmoty. Plyná směs obsahuje dva majoritní plyny (metan a oxid uhličitý), rovněž obsahuje další minoritní složky (vodu, sirovodík, dusík, kyslík a vodík). Průměrné zastoupení jednotlivých složek uvádí tab.1 [15].

Podíl	Koncentrace
Metan (CH ₄)	50–75 %
Oxid uhličitý (CO ₂)	25–45 %
Voda (H ₂ O)	2–7 %
Sulfan (H ₂ S)	0,002–2 %
Dusík (N ₂)	pod 2 %
Kyslík (O ₂)	pod 2 %
Vodík (H ₂)	2 %

tab. 1: Průměrné složení bioplynu, upraveno [15]

Klíčový výtěžek metanu závisí na technických podmínkách procesu (teplota fermentace, doba zdržení, míchání atd.) a na složení a biologické rozložitelnosti substrátu [15].

2.4.1 Anaerobní fermentace

Metanová fermentace je biologický proces rozkladu organické hmoty probíhající za nepřítomnosti vzduchu. Při tomto procesu směsná kultura mikroorganismů postupně v několika dílčích, na sebe navazujících, fázích rozkládá biologicky rozložitelnou hmotu. Produkt jedné skupiny mikroorganismů se stává substrátem pro následující skupinu, tudíž výpadek jediné skupiny by mohl zapříčinit poruchy v celém systému [22].

Základní fáze můžeme rozdělit na:

- Hydrolýza (1. fáze) – jsou rozkládány makromolekulární organické látky (polysacharidy, bílkoviny, tuky) na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě.

Rozpustnost zajistí extracelulární hydrolytické enzymy produkované hlavně anaerobními bakteriemi [22].

- Acidogeneze (2. fáze) – produkty hydrolýzy jsou štěpeny na jednodušší organické látky (CO_2 , H_2 , alkoholy, kyseliny). Dojde striktně ke vzniku bezkyslíkatého prostředí [18].
- Acetogeneze (3. fáze) – probíhá oxidace produktů acidogeneze na H_2 , CO_2 a kyselinu octovou [22].
- Metanogeneze (4. fáze) – činností metanogenních acetotrofních bakterií vzniká metan a oxid uhličitý z kyseliny octové. Hydrogenotrofní bakterie produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého [22].

2.5 Digestát

Vedlejším výstupním produktem při výrobě bioplynu v BPS je nerozložený digestát, který může být dále rozdělen na separát (pevnou část) a fugát (kapalnou část). Všechny tři frakce (digestát, separát, fugát) jsou využívány jako organické hnojivo [23]. Separát lze také kompostovat, sušit a spalovat či využít i jako stelivo. Fugát je možné zpět vrátit do procesu BPS [24].

2.5.1 Aplikace

Cenný amonný dusík obsažený v digestátu se uvolňuje do ovzduší, tomu lze předejít včasným zapravením digestátu, nebo jeho separovaných složek, separátu a fugátu, do orné půdy a aplikací při nižších teplotách. Tím se sníží emise amoniaku o 30-70 %. Pro aplikování během vegetace se používají hadicové aplikátory (obr. 9), kdy se digestát okamžitě vsakuje do půdního profilu [23].

Využití digestátu má mnoho předností jako je snížení zápachu, redukce patogenů, omezení klíčivosti semen plevelů, snížení žíravého účinku surové kejdy na plodiny, zachování žádoucích forem organického uhlíku a živin (P, K, N). Přispívá ke zvýšení odolnosti plodin a nižší spotřebě pesticidů [25].



obr. 9: Farmy Bedfordia – Aplikace digestátu [23]

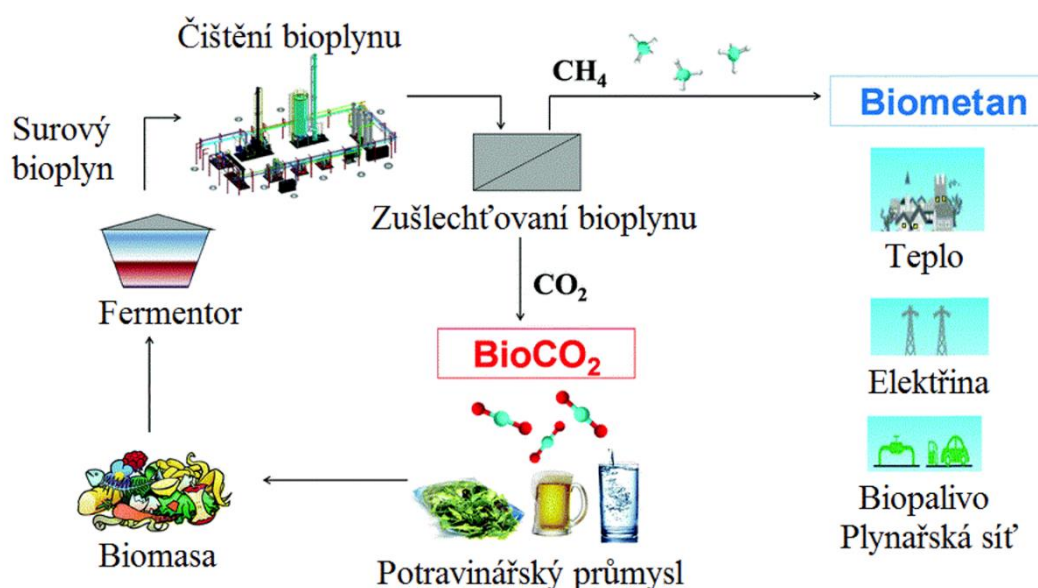
2.5.2 Znehodnocování půdy

Digestát obsahuje málo sušiny a velmi málo uhlíku, který nepodléhá rychlému rozkladu v půdě. Tím je způsobeno jisté znehodnocení půdy, kde je digestát aplikován. Řešitelnost průmyslovými hnojivy není na místě. Nedostatek uhlíku lze vyřešit ponecháním slámy se společnou aplikací digestátu nebo využitím digestátu k výrobě kompostu [26].

3 Biometan

Surový bioplyn získaný z biomasy anaerobní fermentací sestává primárně z oxidu uhličitého v rozsahu 30–50 % a metanu v rozsahu 50–70 %. Kromě těchto dvou plynů obsahuje v menším množství i několik vedlejších nežádoucích sloučenin (např. N_2 , O_2 , H_2O , NH_3 , H_2S) [27]. Čištěním a následným zušlechťováním bioplynu lze získat biometan tzv. zelený plyn, který musí obsahovat minimálně 95 % CH_4 a podíl CO_2 by neměl přesahovat 2,5 % [28]. Biometan má analogické složení jako zemní plyn, což umožňuje jeho všestranné využití bez nutnosti adaptace současných technologií [29]. Obnovitelný metan tak přispívá ke snižování emisí skleníkových plynů v různých odvětvích. Uplatnění nalezne při dodávání tepla a energie do budov či jako biopalivo pro dopravní sektor. Mezi další výhody biometanu patří snadné skladování a kontinuální výroba umožňující vyrovnávat dodávky energie z diskontinuálních obnovitelných zdrojů (solárních či větrných) [30].

Vedlejším produktem při upgradu bioplynu na biometan je CO_2 , jenž lze nadále využít například v potravinářském průmyslu nebo k urychlení fotosyntézy ve sklenících. Tím se uzavře tzv. krátký uhlíkový cyklus. Na začátku cyklu se používá uhlík obsažený v biomase k výrobě bioplynu, který obsahuje molekuly uhlíku. Následně se vrací v podobě digestátu uhlík do půdy. A nakonec se valorizací oxidu uhličitého po výrobě zeleného plynu zajistí odstranění uhlíku z atmosféry [30]. Schematické znázornění udržitelného cyklu anaerobní fermentace se současnou výrobou biometanu a potravinářského $BioCO_2$ je na obr. 10.

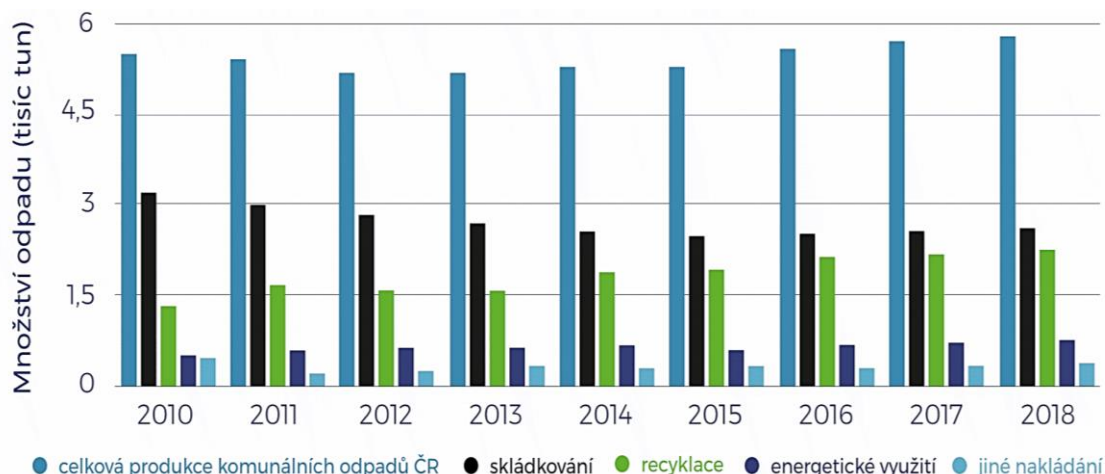


obr. 10: Udržitelný cyklus anaerobní fermentace se současnou výrobou biometanu a potravinářského $BioCO_2$, upraveno [31]

Tato kapitola se věnuje perspektivě biometanu v samotné České republice a v Evropě. Dále poskytuje přehled a princip komerčně dostupných technologií a vyvíjejících se postupů na úpravu bioplynu. Porovnává zušlechťovací technologie na úrovni komerční připravenosti, popisuje možná využití upraveného bioplynu a jeho udržitelnost.

3.1 Výroba biometanu v České republice

V tuzemsku je potenciál k výrobě přibližně 185 mil. m³ biometanu z odpadu. V České republice v roce 2019 bylo vyprodukováno 5,8 mil. tun směsného komunálního odpadu, jenž ze 40 % obsahoval BRKO. Z jedné tuny tohoto bioodpadu je možné získat okolo 125 m³ bioplynu. Zpracováním veškerého BRKO by přispělo ke snížení emisí CH₄ až o čtvrtinu. V Česku se v současné době nachází okolo 570 BPS. Reálně by se tedy mohla produkce biometanu pohybovat okolo 750 mil. m³ každý rok [32]. Množství vyprodukovaného komunálního odpadu a jeho nakládání v ČR v letech 2009–2018 je znázorněno v grafu 1.



graf 1: Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR 2009–2018 [33]

Pro Českou republiku je zařazení biometanu mezi zdroje energetického mixu nevyhnutelné, pokud má být splněn národní cíl podílu obnovitelné energie v sektoru dopravy, který stanovila EU na 14 % [32]. Aktuálně má ČR k dispozici 208 čerpacích stanic pro běžné CNG, které lze využít i pro čerpání stlačeného biometanu. Automobily poháněné fosilním CNG mohou bez jakýchkoliv úprav využívat BioCNG, a tak rozšíření sítě dosavadních čerpacích zařízení pro zemní plyn by přispělo k rozvoji využívání biometanu [34].

Výrobu biometanu a jeho vtláčení do plynárenské soustavy v tuzemsku provozuje v současné době pouze Energetické centrum recyklace Rapotín od roku 2019 viz podkapitola 3.1.1 [34]. Další BPS produkující biometan plánuje společnost Organic technology v Horní Suché na Karvinsku. Zahájení provozu se očekává v druhé polovině roku 2021. Zpracovávat bude jen biologicky rozložitelný odpad (BRO). Do plynárenské soustavy chce dodávat okolo 3,2 mil. m³ ročně. V areálu Ústřední čistírny odpadních vod na Císařském ostrově v Praze se chystá výstavba biometanové stanice, kterou zamýšlí Pražská vodohospodářská společnost. Spuštění provozu připravuje na rok 2022 [35].

3.1.1 Energetické centrum recyklace Rapotín

Energetické centrum recyklace Rapotín je považováno za jednu z nejmodernějších BPS v tuzemsku. Jako první dodává biometan do distribuční plynárenské sítě, zde spravované společností GasNet [36]. Obdržela certifikaci ISCC za splnění nutných kritérií, jejíž cílem bylo stanovit uhlíkovou stopu a úsporu emisí vyrobeného biometanu. ECR Rapotín

dokáže přeměnit na energii až 30 tisíc tun bioodpadu [33]. Využívá technologii pro upgrade bioplynu dodanou na český trh firmou Biomethane CE. Jedná se o třístupňovou membránovou separaci zaručující efektivní výrobu biometanu s nízkými provozními náklady. Zařízení produkuje 260–300 m³ bioplynu za hodinu, tomu by měla odpovídat roční výroba okolo 1,3 mil. m³ [36]. Pozitivum tvoří též výtěžnost CH₄ přesahujících 99 %. Instalací zařízení na zušlechťování bioplynu se ekonomická efektivnost výroby obnovitelného zdroje energie zvýšila o 30 %. Kontejner membránové technologie a filtry s aktivním uhlím z ECR Rapotín lze vidět na obr. 11. Biopalivo z Rapotína se testovalo v provozu už minulý rok se společností innogy Energo, která nabídla BioCNG na svých 63 čerpacích stanicích na CNG v celé síti ČR [33].



obr. 11: Kontejner s technologií membránové separace – v popředí filtry s aktivním uhlím [36]

3.1.2 Předpokládaný vývoj biometanu

Biometan by mohl v ČR zcela nahradit zemní plyn [37]. Asi 150 soudobých BPS lze připojit na plynárenskou distribuční síť. V tomto desetiletí by se mohlo transformovat na produkci biometanu až 75 provozoven s odhadovanou celkovou produkcí 127 mil. m³ plynu ročně [38]. V současnosti se u nás nachází přibližně 26 tisíc vozidel jezdících na CNG, jejich počet neustále roste. Do roku 2030 by se měl navýšit počet čerpacích stanic na 400, které tou dobou bude využívat okolo 55 tisíc dopravních prostředků s odhadovanou spotřebou do 200 mil. m³ CNG [37].

Praha realizující koncept cirkulárního užítkování bioodpadů v BPS chce vyrobený biometan využívat jako biopalivo. Roční produkce ze 100 000 tun biologicky rozložitelného odpadu může činit 7,8 mil. m³ biometanu, což odpovídá 78 GWh energie. Takové množství vyprodukované energie by dokázalo celoročně pohánět celý vozový park Pražských služeb, který zahrnuje 147 osobních a 573 nákladních vozidel a 63 autobusů městské hromadné dopravy [39].

Společnost EFG Green gas připravuje technologické vybavení na výrobu biometanu na několika zemědělských BPS [38]. V zahraničí je poptávka po zeleném plynu vysoká, přesto pro společnost EFG dodávat mimo ČR není prioritou. Česko by využitím veškerého potenciálu biometanu snížila emise CO_{2eq} o 218 tisíc tun každý rok [33].

3.1.3 Podpora biometanu

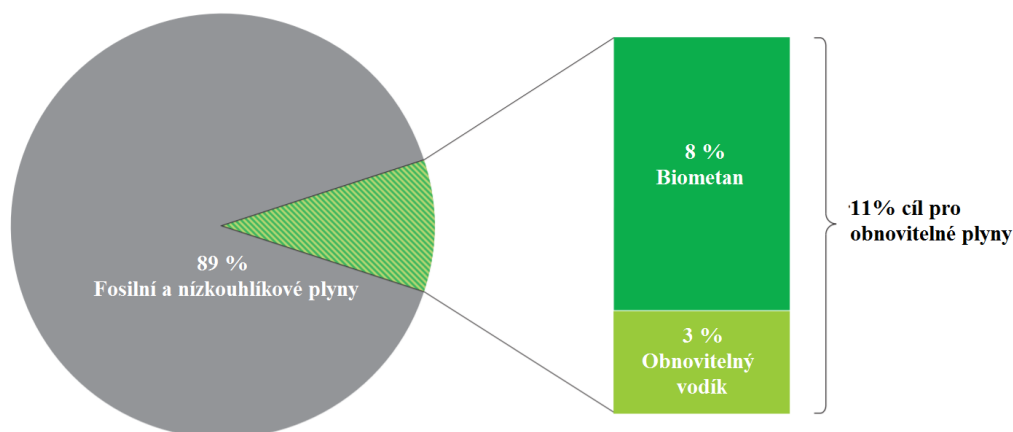
Vláda ČR plánuje provozní podporu pro biometanové stanice, která by měla platit od roku 2021. Dotace by měly přispět ke zvýšení podílu spotřeby OZE v dopravním sektoru na 14 % v roce 2030 z původních 6,6 % v roce 2017. K dosažení cíle pomohou biopaliva produkovaná z biologicky rozložitelného odpadu, jejich rostoucí spotřebu bude z největší části zajišťovat právě biometan. Roční zelený bonus podporující výrobu biometanu má čítat maximálně 1 700 Kč/MWh. Dle ředitele společnosti EFG Engineering by se však takových provozoven v ČR mohlo postavit jen několik [40].

Očekává se tedy, že některé stávající BPS budou umožňovat upgrade bioplynu na biometan. Bioplynovým stanicím se tak naskytla zajímavá příležitost, jelikož jejich podpora je aktuálně zaměřená jen na kogeneraci (kombinovaná výroba elektřiny a tepla) a bude trvat nanejvýš 20 let. Prodloužení podpory zatím není jasné. Produkci biometanu si provozovatel zajistí provozní podporu na další období [40].

Pokud se v roce 2030 vyrobí plánovaný objem zeleného plynu, celková podpora od státu by měla dosahovat nejvíce 2,3 mld. korun každým rokem. Úprava BPS na výrobu biometanu má smysl pouze u těch zařízení, které jsou v blízkém dosahu k přepravní infrastruktuře. Přibližně se jedná o polovinu provozoven. Odhadem by mohla biometanová stanice od státu inkasovat podporu za vyrobený biometan až 15 mil. Kč ročně [40].

3.2 Perspektiva biometanu v Evropě

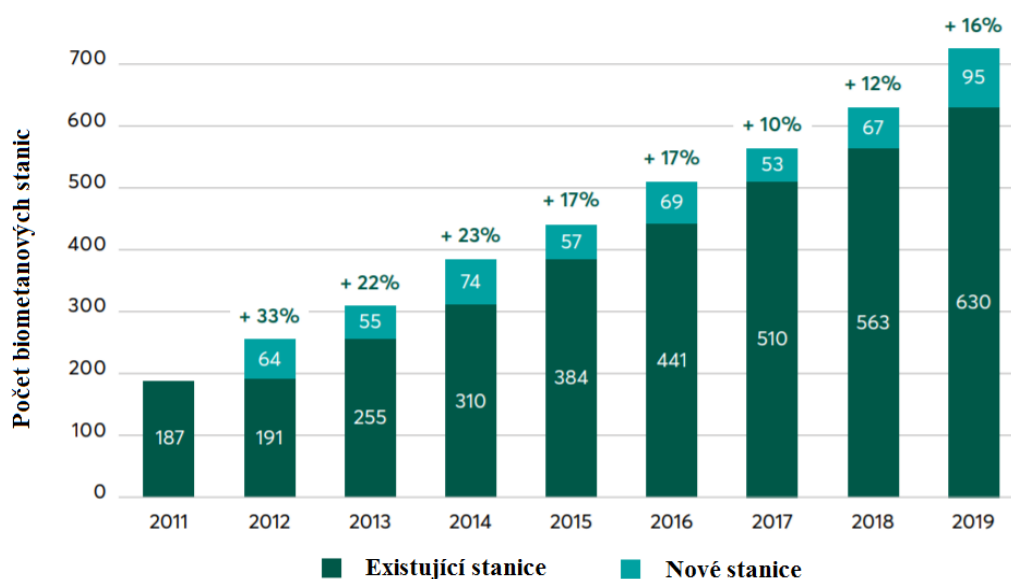
Evropská unie (EU) přijala za cíl snížit emise skleníkových plynů do roku 2030 o 55 % ve srovnání s rokem 1990 a stát se klimaticky neutrálním kontinentem do roku 2050. Při dosažení těchto ambiciózních cílů budou mít důležitou roli obnovitelné a nízkouhlíkové plyny. K urychlení rozvoje těchto plynů budou zapotřebí dlouhodobé politické pobídky a jistota. Evropská plynárenská skupina Gas for Climate vyzývá Evropskou komisi, aby do směrnice o obnovitelné energii RED II zahrnula 11% cíl pro obnovitelné plyny, tedy do roku 2030 by musela spotřeba činit 11 %. Dílčí cíle by tvořily biometan alespoň z 8 % a zelený vodík nejméně ze 3 % (graf 2). Takto stanovený cíl by se měl realizovat s výrazným signálem, že po roce 2030 bude podíl obnovitelných plynů nejen pokračovat, ale i narůstat. Výrobci společně se sektorem konečné aplikace by tak získali jistotu co se týče dlouhodobého časového horizontu plynů z obnovitelných zdrojů [41].



graf 2: 11% cíl pro obnovitelné plyny do roku 2030, upraveno [41]

Díky nízkým dopadům na životní prostředí se biometan bude z velké části podílet na dekarbonizaci energetiky [39]. Dynamičnost trhu se zeleným plynem v posledních letech výrazně narůstala [42]. Graf 3 znázorňuje vývoj BPS s upgradem na biometan v Evropě v letech 2011–2019. V EU se v období 2018–2020 nárůst biometanových stanic zvýšil o 51 %. Celkový počet tak čítá 729 zařízení, přičemž největší podíl má Německo (232), Francie (131) a Velká Británie (80) [39]. Dle Evropské bioplynové konference asociace EBA by produkce biometanu do roku 2030 mohla činit okolo 39 mld. m³ při exponenciálním vývoji sektoru bioplynu. K dosažení cíle se musí dostavět 9 900 nových stanic k 18 000 již existujících BPS s průměrnou produkcí 500 Nm³/h biometanu [4].

Biometan vyráběný z organických materiálů procesem anaerobní fermentace by do roku 2050 mohl dosáhnout 64,2 mld. m³. Energetický potenciál by tak představoval téměř 640 TWh ročně, tedy za předpokladu, že z 1 Nm³ zeleného plynu se vyrobí 10 kWh energie. Aby se dospělo ke zmíněné produkci do roku 2050, růst aktuálního sektoru biometanu, který představuje 22 TWh ročně, by se musel 30krát navýšit. Konečná energetická spotřeba členů EU–28 v roce 2017 činila 13 421 TWh za rok, tedy 4,8 % této spotřeby by tvořila předpokládaná výroba biometanu v roce 2050 [2].



graf 3: Vývoj biometanových stanic v Evropě v letech 2011–2019, upraveno [43]

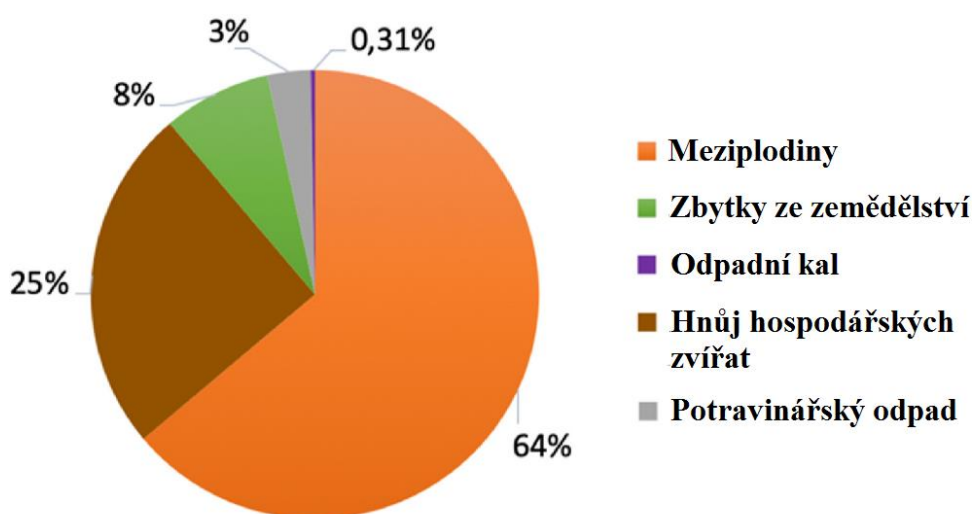
3.2.1 Bioodpad

Biologicky rozložitelný odpad obecně nazývaný jako bioodpad vzniká lidskou činností převážně v průmyslu, zemědělství a jiné výrobě. V současné době se používá pro produkci bioplynu převážně biomasa ze zemědělství, která tvoří více než 70% podíl energie v generovaném bioplynu. Předpokládá se, že tento druh biomasy v budoucnu bude stále představovat největší dostupná ložiska. Proto největší potenciální růst na trhu mají biometanové stanice zpracovávající právě zemědělskou biomasu. Odhadovaný výrobní potenciál biometanu ze zemědělských surovin v EU do roku 2050 čítá 62 mld. m³ ročně, což je 30krát vyšší produkce v porovnání s potenciálem odpadního kalu a potravinářského odpadu, který odpovídá 2,2 mld. m³ biometanu ročně [2].

Dále se v EU vyprodukuje přibližně 1 200 mil. tun hnoje hospodářských zvířat, z čehož by bylo možné nashromáždit 860 mil. tun ke zpracování na biometan. Z tohoto množství by mohl potenciál biometanu každoročně dosahovat zhruba 16 mld. m³. Současně se tímto zabrání uvolňování skleníkových plynů do atmosféry z rozkládajícího se hnoje [2].

Potenciál produkce biometanu z cíleně pěstovaných plodin by se mohl pohybovat do roku 2050 okolo 46 mld. m³ ročně. Z důvodů nízké udržitelnosti se předpokládá postupné nahrazování energetických plodin rostlinnými zbytky a meziplodinami. Odhadovaná produkce biometanu z 30 mil. tun rostlinných zbytků je 5 mld. m³ ročně a ze 147 mil. tun meziplodin čítá 41 mld. m³ ročně. Na dané zemědělské půdě by se mohly během jednoho roku pěstovat dvě plodiny. Hlavní plodina se na zemědělské půdě nachází jen zlomek roku, a tak ve zbylém časovém úseku by se mohla nově pěstovat meziplodina určená pro výrobu biometanu [2].

Předpokládá se, že pro výrobu biometanu se bude stále častěji využívat potravinářský odpad, hnůj, cíleně pěstované meziplodiny a zbytky z obhospodařování krajiny (tráva, zbytky z lignocelulózových plodin, vytrvalé plodiny pěstované v marginálních oblastech). Ze zmíněné biomasy lze vyprodukovat bioplyn s nulovými až zápornými emisemi skleníkových plynů [2]. Graf 4 zobrazuje možný podíl surovin ze zemědělské biomasy pro produkci biometanu v EU v roce 2050.



graf 4: Podíl surovin v optimalizovaném scénáři produkce biometanu v EU v roce 2050, upraveno [2]

3.2.2 Dopravní sektor

Městské bioplynové stanice produkující biometan jsou běžným projektem větších měst v Evropě. Zelený plyn z bioodpadu využívají v dopravě za účelem snížit emise prachových částic, dusíku a skleníkových plynů v metropoli. Světové automobilky v současnosti nabízí bezmála 200 různých modelů vozidel, které jezdí na BioCNG a jsou vyráběny sériově. Brzy do nabídky přibude i Škoda Scala [39]. Dnes se využívá 17 % biometanu jako paliva pro vozidla v téměř 25 % evropské sítě čerpacích stanic. Tato soustava plynových stanic sestává z 3 840 jednotek na CNG a 280 zařízení na LNG [44].

Vyšší spotřeba BioCNG a BioLNG by mohla vést k dosažení stanoveného cíle snížení emisí skleníkových plynů o 55 %. Zároveň bude nutné vytvořit až 1 milion pracovních míst, aby se zajistil rozvoj biometanu v následujících dekádách [44]. V roce 2030 by mohla distribuce biopaliva pro dopravu činit 117 TWh, což odpovídá 40 % veškeré spotřeby všech vozidel na plyn [39]. Tou dobou by se počet těchto vozů mohl pohybovat okolo 13 milionů a síť čerpacích stanic by se skládala z 10 000 CNG a 2 000 LNG stanic. Ročně by se uspořilo na nákladech za palivo odhadem více než 4,5 mld. eur [44].

Od silničního odvětví se předpokládá růst zájmu o plynná paliva, která budou používána především pro pohon nákladní dopravy. Celková spotřeba CNG a LNG v roce 2019 dosahovala téměř 2,5 mld. m³, z čehož asi 15 % byly alternativní paliva BioCNG a BioLNG. Vozový park v roce 2017 čítal více než 1,3 milionů vozidel poháněných plynným palivem. Z toho přes 20 000 autobusů a autokarů jezdících na zemní plyn se skládalo z 15 různých modelů. Počet těchto modelů se za následující dva roky zvýšil o šest. Odhaduje se, že v roce 2030 bude každý třetí nově vyrobený městský autobus a autokar poháněn plynem [5].

Od roku 2015 se poptávka po CNG osobních automobilech nezvyšuje, ale je spíše ustálená či dokonce upadající. Zatímco sektor nákladních automobilů zvyšuje svůj zájem o alternativní palivo LNG. Na trhu se v letech 2015–2019 zvýšil počet modelů nákladních vozidel z jednoho na osm. Rokem 2030 by nové nákladní vozy spalující CNG a LNG mohli tvořit 25 % nákladní flotily [5].

Na dekarbonizaci v dopravě se bude podílet i lodní sektor využitím alternativních paliv. Dnes existují různé technické možnosti, které můžou přispět ke snížení skleníkových plynů v námořním odvětví. Za zajímavé řešení se považuje palivo LNG. Pokud se jedná o BioLNG na bázi komunálního organického odpadu, emise skleníkových plynů vykazují značnou úsporu. V provozu se aktuálně na celém světě nachází přes 100 plavidel poháněných LNG, dále byla potvrzena výroba 101 nových lodí a dalších 72 kusů spalujících jiná paliva je připravena přejít na LNG [5].

3.3 Čištění surového bioplynu

Odstranění nežádoucích látek z bioplynu rozšiřuje rozsah jeho použití [27]. Pro spalování plynu v kogenerační jednotce se musí eliminovat H_2O a H_2S . Využití v dopravě či distribuční plynárenské síti podléhá přísným požadavkům na jeho složení [45]. Jako první úprava se provádí tzv. čištění bioplynu, kdy jsou odstraňovány toxické a škodlivé sloučeniny. Následně se může realizovat zušlechťování bioplynu na biometan, při tomto procesu dochází hlavně k separaci CO_2 viz podkapitola 3.4 [27]. Kontaminanty obsažené v plynu a jejich účinky uvádí tab. 2 [46]. Následující podkapitoly se zaměřují pouze na separaci vody a sulfanu z bioplynu.

Kontaminant	Dopad
H_2O	Koroze v kompresorech, ve skladovacích nádržích a v motorech vznikající v důsledku reakce s H_2S , NH_3 a CO_2 Akumulace vody v potrubí Kondenzace či zmrazení účinkem vysokého tlaku
H_2S	Spalováním vzniká SO_2 a SO_3 , které jsou toxičtější než H_2S , a způsobuje korozi vodou
CO_2	Snížení výhřevnosti
NH_3	Koroze, když se rozpustí ve vodě, to vede ke zvýšení protiblokovacích vlastností motoru, způsobuje vznik NO_x
O_2	Vytváří výbušné směsi způsobené vysokou koncentrací O_2 v bioplynu
Cl^{-1} a F^{-1}	Koroze ve spalovacích motorech
Prach	Usazeniny v kompresorech a zásobnících plynu
Uhlovodíky	Koroze v motorech zapříčiněné spalováním
Siloxany	Tvorba SiO_2 a mikrokystalického křemene spalováním, usazování na zapalovacích svíčkách, ventilech a hlavách válců

tab. 2: Nečistoty bioplynu a jeho účinky, upraveno [46]

3.3.1 Odstranění vlhkosti

Absolutní množství vody obsažené v bioplynu závisí na teplotě (např. při $35\text{ }^\circ\text{C}$ se obsah vody pohybuje okolo 5 %). Se snižující se teplotou klesá i podíl vody v neupraveném bioplynu. Separace H_2O je založena na fyzikálním a chemickém sušení [47].

- Fyzikální metody sušení (kondenzace) – patří k nejjednodušším metodám separace vodní páry z plynu, která probíhá vlivem chlazení. Tento jednoduchý způsob dokáže snížit rosný bod jen na $0,5\text{ }^\circ\text{C}$, důvodem je problém se zamrzáním povrchu tepelného výměníku. Aby se mohlo dosáhnout nižších rosných bodů, musí být bioplyn stlačen před jeho ochlazením a poté následně expandován na požadovanou hodnotu tlaku. Tím lze dosáhnout rosného bodu čítajícího až $-18\text{ }^\circ\text{C}$, kdy ale může nastat již zmíněné zamrzání. Obecně platí že, čím vyšší tlak se aplikuje, tím nižší rosný bod se získá. Kapičky kondenzované vody lze oddělit drátěným sítem s mikropóry o velikosti $0,5 - 2\text{ nm}$, cyklóny využívající k separaci odstředivé síly nebo lapači vlhkosti, ve kterých kondenzace probíhá expanzí, jenž vede k nižší teplotě. Následně se odloučené kapičky H_2O odstraní kohoutkem na bioplynovém potrubí. Tato metoda je schopna současně eliminovat prach a olej

z vyšších uhlovodíků a většinou se využívá jako předúprava pro jiné techniky separace [47].

- Chemické metody sušení (adsorpce či absorpce) – převážně se využívají za vyšších tlaků, jelikož absorpční a adsorpční technologie jsou schopny za atmosférického tlaku vyseparovat pouze malé množství vody. Mezi nejpoužívanější způsoby čištění plynu patří adsorpce za použití oxidu hlinitého nebo molekulárních sít. Pro adsorpci vodní páry se používají látky jako oxid křemičitý, aktivní uhlí nebo oxid hlinitý, jenž dokážou vázat molekuly vody. Natlakovaný bioplyn je veden skrze kolonu naplněnou adsorbentem, čímž dochází k sušení bioplynu. Obvykle se v praxi používají dvě paralelně umístěné kolony, kdy v jedné probíhá adsorpce vody a v druhé regenerace adsorpčního materiálu. Regenerace lze dosáhnout odpařováním vody vlivem dekomprese a zahřívání. Na vstup kompresoru se přivádí část sušeného plynu, jenž znovu projde procesem. Adsorpci lze získat rosný bod v rozsahu -10 až -20 °C. Před započetím procesu se musí z bioplynu eliminovat prach a olej. Další způsob chemického sušení bioplynu je absorpce vody, která probíhá za použití kapaliny triethylenglykol, jenž váže vodu. Použitý glykol je čerpán do regenerační kolony, kde se zregeneruje za teploty 200 °C. Absorpci lze získat rosný bod v rozmezí -5 až -15 °C. Absorpční metoda má schopnost z bioplynu eliminovat i prach a vyšší uhlovodíky [47].

3.3.2 Odsiřování

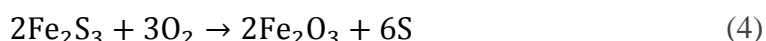
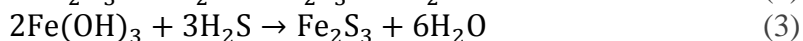
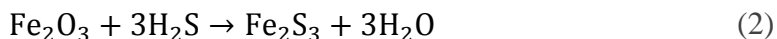
Obsažený sulfan v bioplynu má negativní vliv jak na komponenty BPS, tak i na zdraví lidí [48]. Proto se jeho odstranění považuje za zásadní předtím, než se bude bioplyn dále zpracovat a využívat [42]. Například pro použití plynu jako biopaliva by měla být koncentrace H_2S nižší než 20 mg m^{-3} . Eliminaci sulfanu lze provést přímo ve fermentoru nebo pomocí samostatných jednotek pro adsorpci a biofiltraci [48].

- Dávkování vzduchu či O_2 do systému bioplynu – vytvoří biologickou aerobní oxidaci, při níž skupina mikroorganismů označována jako Thiobacillus přemění sulfan na elementární síru a vodu viz rovnice (1). Tyto autotrofní bakterie se vyskytují na povrchu a rámu fermentoru, získávají uhlík pro vlastní potřebu z CO_2 . Kolem 2–6 % O_2 potřebného ke vzniku reakce se pomocí vzduchového čerpadla dodává do systému BPS. Nesmí nastat předávkování vzduchem. Výbušná směs vzniká při 6–12 % vzduchu v bioplynu. Anaerobní podmínky musí zůstat zachovány. Účinnost této metody činí 80–99 % a koncentraci H_2S lze snížit na $20\text{--}100 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$. Pro nahrazení zemního plynu bioplynem mohou být zbylé koncentrace sirovodíku vysoké. V plynu zůstává přebytek O_2 a N_2 , který vyžaduje další čištění [47]. Potřebné lahve s čistým kyslíkem jsou vysoce nákladné [42]. K přednostem se naopak řadí nižší nároky na obsluhu, údržbu, elektrickou energii a teplo. Proces nevyžaduje žádné chemikálie znečišťující prostředí [47].



- Adsorpce na oxidech nebo hydroxidech železa – používaným materiálem jsou dřevěné štěpky nasycené oxidem železa nebo pelety z červeného bahna impregnované hydroxidem či sloučeninami uhlíku a železa, které mají větší poměr povrchu k objemu než první varianta. Reakcí Fe_2O_3 a $Fe(OH)_3$ se sulfanem vznikne sulfid železitý (rovnice (2) a (3)). Tato mírně endotermická reakce

potřebuje optimální teplotu 25–50 °C k zajištění potřebné energie. Rovnice (4) popisuje exotermickou reakci mezi O₂ a Fe₂S₃, při níž dojde k regeneraci oxidu železa a ke vzniku elementární síry, která na povrchu blokuje aktivní oxid či hydroxid železa. To způsobuje omezení počtu proveditelných cyklů. Během reakce může dojít ke vznícení třísek vlivem vysoké teploty. Zařízení se typicky skládá ze dvou reakčních lůžek. V jednom se provádí regenerace a v druhém se adsorbuje H₂S z plynu. Účinnost této techniky převyšuje 99 %. V průběhu adsorpce vznikají zápachající sloučeniny, které musí být zadrženy. Během tohoto jednoduchého procesu se může uvolňovat i toxický prach. Náklady na provoz jsou vysoké ve srovnání s těmi investičními [47].



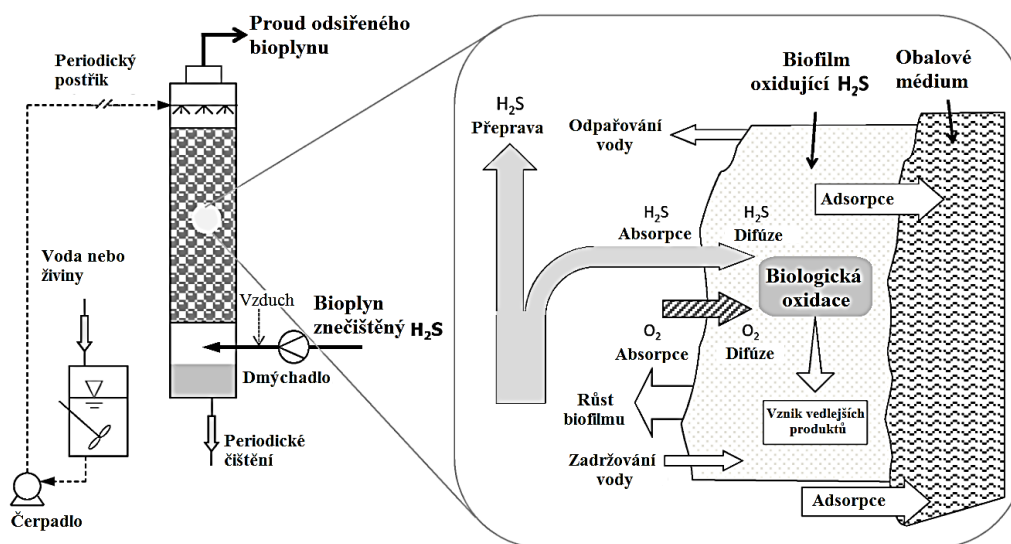
- Adsorpce na aktivním uhlí – vysoce porézní aktivní uhlí (obr. 12) má velkou adsorpční kapacitu. Značná účinnost se projevuje při nižších koncentracích H₂S. Katalyticky se převádí sulfan na elementární síru a síran za přítomnosti kyslíku. Nejlepší reakce lze docílit při použitém tlaku 700–800 kPa a teplotě okolo 50–60 °C, které se snadno dosáhne při kompresi. Přidáním vhodné chemikálie (např. NaOH a KOH) může vzniknout další oxidace sulfidů vytvářející sulfidové soli. Tím se navýší kapacita odběru H₂S například z 10–20 kg m⁻³ na 120–140 kg m⁻³. Impregnace způsobí snížení potřebné teploty ke vznícení uhlíku, může tak dojít k samovznícení [48]. V případě nepřetržitého provozu se systém může skládat ze dvou kolon, kdy jedna slouží pro adsorpci a druhá k regeneraci. Regenerace se provádí ohřátým dusíkem či párou. Elementární síra se odpaří a po následném ochlazení na 130 °C zkondenzuje. Aktivní uhlí je spíše substituováno, než regenerováno. Metoda umožňuje snížit koncentraci H₂S pod 3 cm³ m⁻³ impregnací KI v rozsahu 1–5 % a regenerací při 450 °C. Přednosti procesu zahrnují vysokou rychlost odsiřování za nízkých provozních teplot a kompaktní techniku. Nevýhodou jsou zase vyšší investiční a provozní náklady [47].



obr. 12: Extrudované pelety s aktivním uhlím pro odstraňování H₂S z bioplynu [49]

- Biologická filtrace – proud bioplynu se typicky protlačuje vrstvou anorganických či organických porézních materiálů. Hlavní částí biofiltru tvoří tenký biofilm a obalové médium. Biofilm je složený z mikroorganismů a vody. Zde dochází

k absorpci molekul kontaminantů z plynné fáze. Zvlhčování udržuje mikroorganismy naživu. Materiál obalového média musí poskytnout živiny a vhodné mikroprostředí pro mikroby, aby byl zajištěn jejich růst a vývoj. Efektivnost eliminace nečistot vysoce závisí na aktivitě buněk. Rychlost rozkladu také závisí na dalších charakteristikách materiálu lože zahrnující zadržování vody, hodnotu pH a mechanické vlastnosti. Elementární síra a síran se produkují mikrobiální oxidací. Biodegradací H_2S vzniknou meziprodukty jako S^{2-} a HS^- . Pro mikroorganismy jsou tyto produkty zdrojem energie, tím podporují ekologickou šetrnost a soběstačnost provozu. Tedy mikrobům se dodává energie oxidací anorganických materiálů a tím se stanovuje účinnost biofiltru. Komplexní interakci znázorňuje obr. 13 níže. Touto metodou lze snížit koncentraci H_2S v bioplynu i pod 1 g m^{-3} . Dle nedávných výzkumů efektivnost obalového média CM-5 (kompozitní médium-5), což je směs cementu, vyzrálého kompostu, uhličitanu vápenatého, anorganického pojiva, porézního perlitu a rostlinného vlákna, dosahovala až 100 % [50].



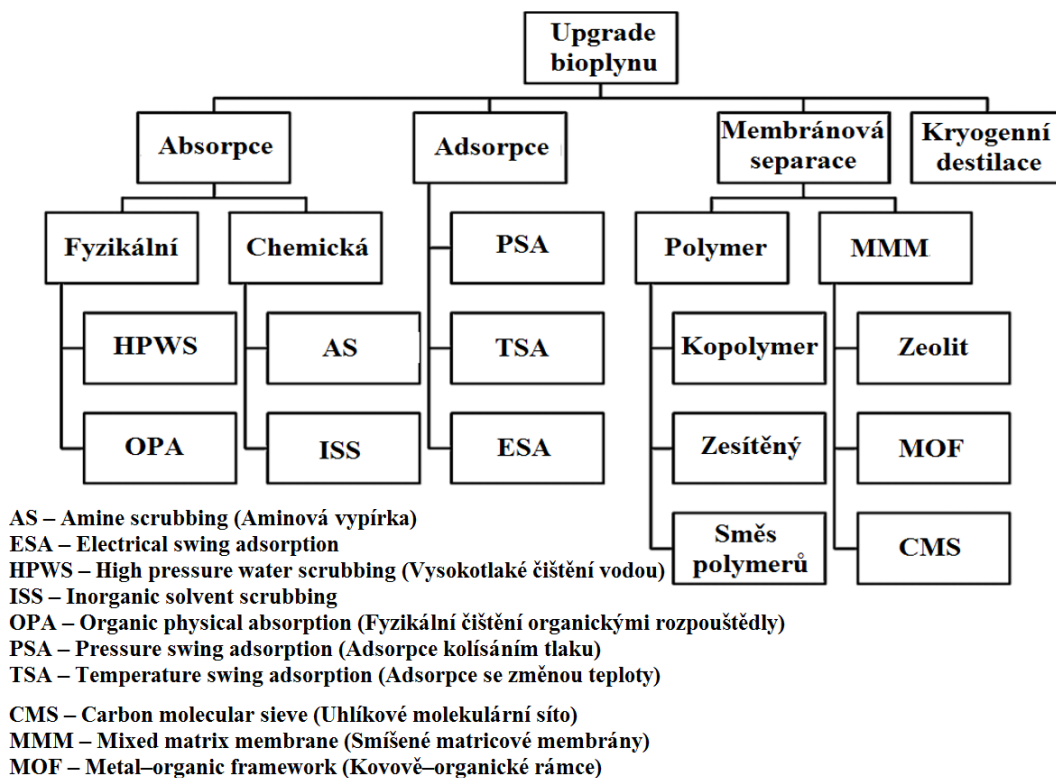
obr. 13: Schematické znázornění interakce probíhající v biofiltrech, upraveno [51]

3.4 Technologie pro upgrade bioplynu

Přeměnění bioplynu na vyšší palivový standart vyžaduje zvýšení výhřevnosti, tedy eliminaci CO_2 . Pokud se bioplyn čistí dle analogických specifikací jako běžný zemní plyn, výsledný produkt se nazývá biometan. Dnes existuje několik různých technologií na zušlechťování plynu (obr. 14) sloužících především na oddělení dominantních složek CH_4 a CO_2 . Komerčně dostupné technologie jsou založeny na absorpci (fyzikální či chemické), adsorpci kolísáním tlaku (PSA) a na membránové separaci (MS). Dále existují technologie zahrnující kryogenní destilaci a chemickou hydrogenaci, které jsou v současné době ve vývoji [27]. Funkční principy zmíněných technologií jsou podrobněji představeny v nadcházejících podkapitolách, včetně jejich předností a nevýhod.

Odloučený oxid uhličitý lze převést na CH_4 s reakcí H_2 [27]. Nebo se BioCO_2 aplikuje tam, kde se využívá běžné CO_2 s fosilními základy [52]. Vyžaduje se vysoká čistota CH_4 , aby mohl být zelený plyn vstřikován do distribuční plynárenské soustavy či využitkován v dopravním sektoru. S tím se pojí vysoký obsah energie, snadnější přeprava plynu, skladování a technická omezení. Například plynná směs obsahující CO_2 a CH_4 při

akumulaci v tlakových lahvích nemůže být stlačena pod tak velkým tlakem jako biometan, který využívá ke kompresi přibližně 20–25 MPa [42].



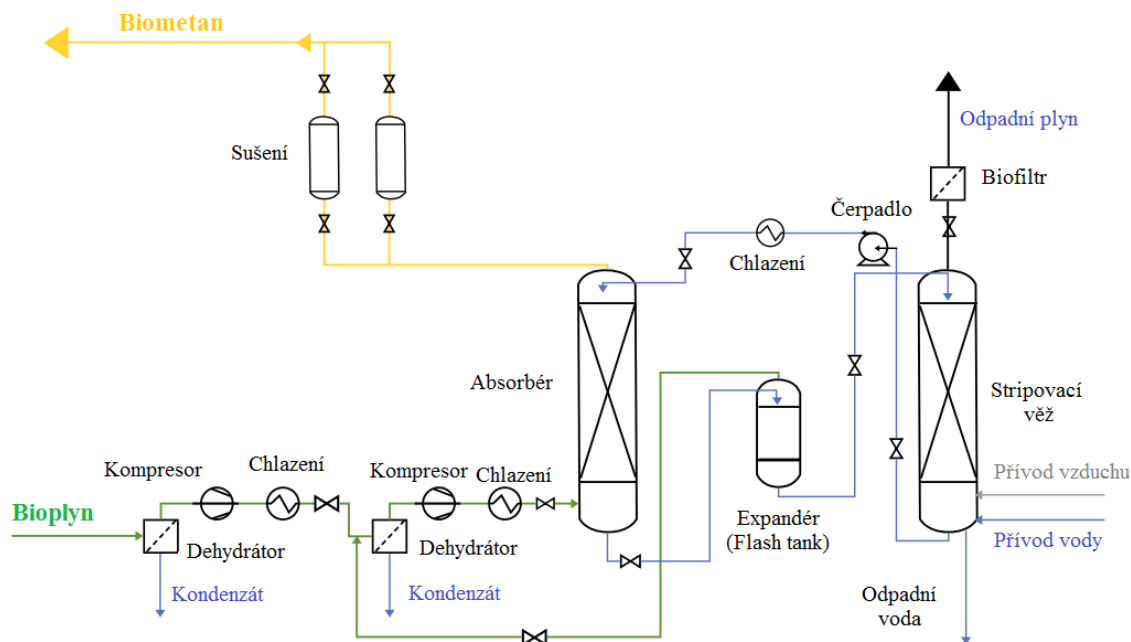
obr. 14: Soudobé technologie pro upgrade bioplynu, upraveno [53]

3.4.1 Technologie HPWS (High pressure water scrubbing)

Vysokotlaké čištění vodou je nejčastější používanou technologií pro upgrade bioplynu, ze kterého eliminuje CO_2 i H_2S . Neboť tyto nečistoty se ve vodě rozpouštějí více než CH_4 [46]. Rozpustnost každé sloučeniny ovlivňuje výše tlaku [53]. Pro proces fyzikální absorpce platí Henryho zákon, který říká, že koncentrace rozpuštěného plynu je přímo úměrná parciálnímu tlaku v proudu plynu za konstantní teploty [46]. Tedy rozpustnost metanu ve vodě o teplotě 25 °C je přibližně 26krát nižší než u oxidu uhličitého [27]. Pokud bioplyn obsahuje vysokou koncentraci H_2S , je nezbytné snížit obsah sulfanu před vstupem do procesu HPWS [46].

Na začátku procesu se bioplyn pod tlakem 200 kPa vtlačí do separátoru, kde voda a nečistoty těžší než CH_4 a CO_2 kondenzují [53]. Následně se komprimuje plynná směs na 600–1000 kPa, a 40 °C. V tomto stavu se přivede ze spodní strany do absorpční kolony, kdežto injekce vody se provádí se shora proti proudu bioplynu [27]. Protiproudem se navýší interakce mezi plynem a H_2O [42]. Absorbér bývá zevnitř dále obalen materiálem, aby se navýšil přenos hmoty mezi kapalinou a plynnou směsí. Horní částí věže se odvádí biometan a naopak odpadní voda obohacená CO_2 , H_2S a malým množstvím CH_4 odtéká spodním úsekem kolony [27]. Kapalná fáze proudí do expandéru (Flash tank), kde se tlak sníží na 250–350 kPa a dochází k uvolňování CH_4 , který se zregeneruje [42]. Voda se následně regeneruje a vrací zpět do absorpční věže [46]. K regeneraci vody dochází za sníženého tlaku na 100 kPa v desorpční jednotce [53]. Nebo se obnoví stripováním vzduchem v desorbéru pouze za podmínky nízkých koncentrací H_2S v plynu.

Vysoká koncentrace sulfanu by rychle znečistila vodu elementární sírou způsobující provozní problémy a korozi. Proto se doporučuje využít levný zdroj čerstvé vody, pokud je k dispozici. Výsledný biometan opouštějící kolonu obsahuje H_2O , musí tedy následovat proces sušení [46]. Obr. 15 schematicky popisuje komplexní proces HPWS.



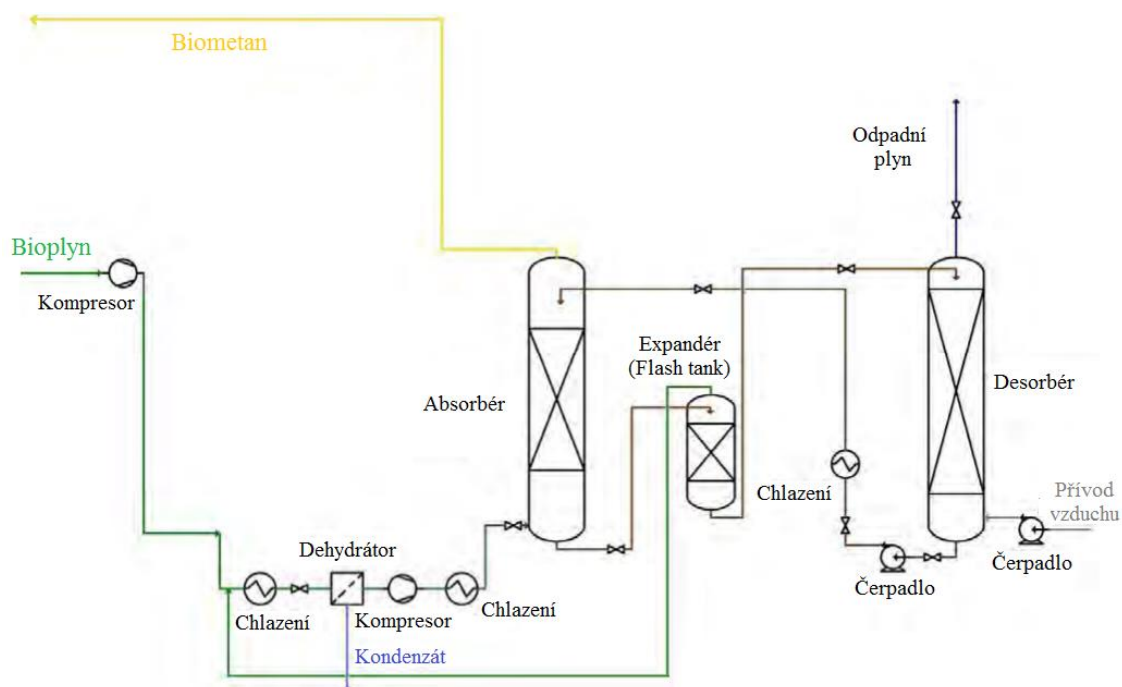
obr. 15: Schéma technologie HPWS, upraveno [54]

Metoda HPWS se vyznačuje svojí vysokou účinností čištění plynu, při níž lze dosáhnout čistoty metanu v kvalitě větší než 97 % se ztrátami metanu pod 2 %. Během procesu nejsou požadovány žádné chemikálie či speciální manipulace. Technika vyžaduje vysoké investice a provozní náklady. Během čerpání vody a stlačování plynu se spotřebuje velké množství energie, což se projeví na výši nákladů [46]. Typicky k průtoku $1\,000\,\text{Nm}^3/\text{h}$ surového bioplynu je zapotřebí $180\text{--}200\,\text{m}^3/\text{h}$ H_2O . Množství spotřebované vody závisí na provozním tlaku a její teplotě [27].

3.4.2 Technologie OPA (Organic physical absorption)

Tato metoda čištění pracuje na stejném principu jako HPWS, ale místo vody se k absorpci kontaminantů aplikuje organické rozpouštědlo. Používanými organickými rozpouštědly jsou methanol (CH_3OH), N-methylpyrrolidon a ethery polyethylenglykolu (PEG). Selexol® a Genosorb® jsou příklady obchodních označení pro kapalinu PEG [46]. Tyto rozpouštědla umožňují podstatně vyšší rozpustnost CO_2 v porovnání s vodou [27]. Například PEG dokáže absorbovat 5krát více CO_2 než voda při stejné kapacitě upgradu [46]. To v podstatě znamená snížení spotřeby kapaliny v systému a menší rozměry zařízení pro upgrade [27]. Společně s CO_2 se z bioplynu eliminují i sloučeniny H_2S , H_2O , O_2 , N_2 a halogenderiváty, ale doporučuje se odstranění sulfanu před tímto procesem [46]. Důvodem doporučení je vyšší rozpustnost H_2S v rozpouštědle Selexol® v porovnání s oxidem uhličitým. Tedy v průběhu regenerace organického rozpouštědla se teplota musí výrazně zvýšit, aby bylo možné oddělení sulfanu od směsi [27].

Bioplyn se vystaví kompresi na 600–800 kPa a zchlazení před vstupem do spodní části absorpční kolony. Proti proudu plynu je seshora věže vstřikováno ochlazené organické rozpouštědlo. Snížení teplot látek pomáhá udržovat v absorpční koloně teplotu kolem 20 °C. Zespod nádrže se odvádí nasycené rozpouštědlo do expandéru (Flash tank), kde se uvolňuje rozpuštěný metan a malá část oxidu uhličitého za sníženého tlaku. Uvolněné plyny cirkulují zpět na vstup bioplynu. Organické rozpouštědlo se ohřeje na 40 °C a poté vstupuje do desorpční jednotky, kde probíhá proces regenerace za sníženého tlaku na 100 kPa. Odtud se regenerované rozpouštědlo dopraví do absorpční kolony [46]. Na obr. 16 je znázorněn postup této technologie.

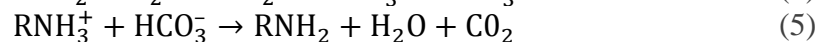
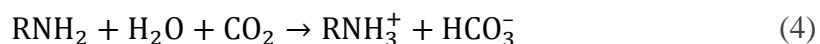


obr. 16: Schéma technologie OPA, upraveno [55]

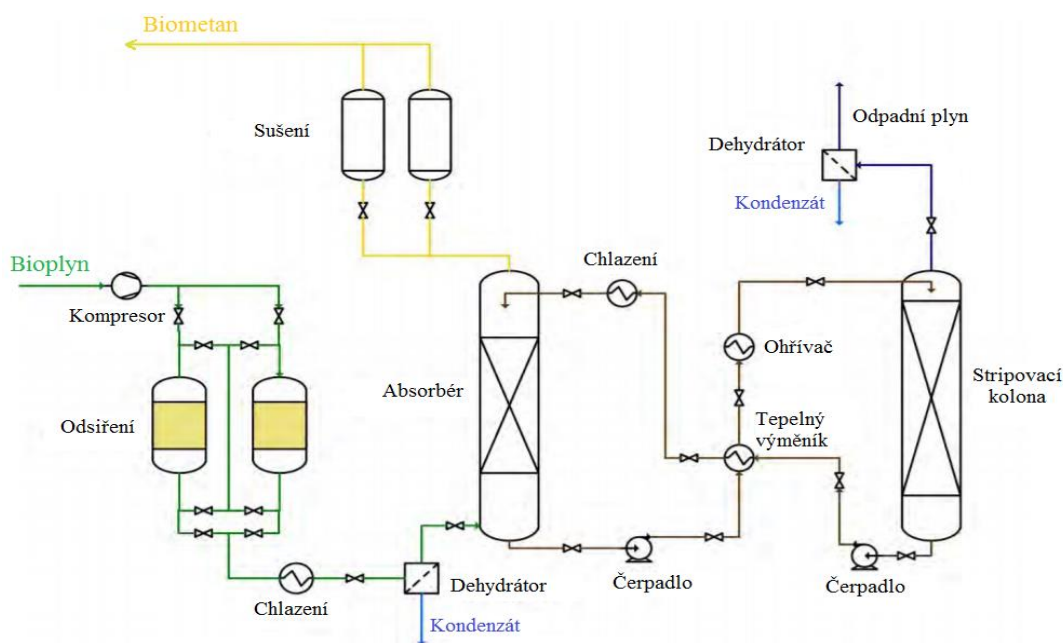
Zušlechťovaný plyn užitím této technologie může obsahovat 98 % CH₄ a ztráty metanu v procesu se pohybují v rozmezí 2–4 % [27]. Ve srovnání s HPWS má tato metoda lepší účinnost separace oxidu uhličitého. Na druhou stranu se spotřebuje více energie při regeneraci rozpouštědla, které je výrazně nákladnější než voda a také náročnější na manipulaci. Tedy náklady jak investiční, tak provozní jsou spíše vysoké [46]. Hlavní překážkou technologie představuje obtížná regenerace organického rozpouštědla z důvodů vysoké rozpustnosti CO₂ [27].

3.4.3 Technologie AS (Amine scrubbing)

Chemická absorpce zahrnuje reverzibilní reakci mezi kontaminanty a chemickým rozpouštědlem. Nejčastěji používanými absorbenty jsou aminové sloučeniny typu monoethanolamin, diethanolamin a methyldiethanolamin (MDEA) [42]. Dnes se běžně používá i aktivovaný MDEA (AMDEA), což je směs MDEA a piperazinu. AMDEA dosahuje značně vyšší absorpční kapacity než samotný MDEA [46]. Aminová rozpouštědla mají vysokou absorpční selektivitu CO₂ [42]. Technologie umožňuje současně eliminovat CO₂ i H₂S [27]. Níže rovnice (4) popisuje reakci absorpce CO₂ a rovnice (5) uvádí reakční děj desorpce oxidu uhličitého. Znak R označuje organickou složku (např. (CH₂)₂OH pro monoethanolamin) [45].



Proces chemické aminové vypírky sestává primárně z absorpční kolony a odlučovače. Bioplyn se přivádí pod tlakem 100–200 kPa na dno absorbéru a současně se aminové rozpouštědlo vstříkuje seshora proti proudu plynu [27]. Vzniká exotermní reakce, která navyšuje teplotu absorpční věže z 20–40 °C na 45–65 °C, vázající CO₂ do absorbentu. Reakční rychlost mezi CO₂ a rozpouštědlem narůstá se zvyšující se teplotou, tím vzrůstá i kapacita absorpce. Z horní části chemické kolony vystupuje biometan [46]. Obohacené rozpouštědlo o CO₂ a případně o H₂S proudí do stripovací jednotky za účelem regenerace. K regeneraci dochází při relativně nízkém tlaku 150–300 kPa a vysoké teplotě v rozsahu 120–160 °C. Teplota narušuje chemické vazby, jež se vytvořily v absorpční jednotce, a také zformuje páru, která slouží pro stripování. Pára obsahující CO₂ se ochladí v kondenzátoru, tím dojde k uvolnění CO₂, a následně jako kondenzát recirkuluje zpět do stripovací věže [27]. Obr. 17 níže schematicky popisuje celý proces AS.



obr. 17: Schéma technologie AS, upraveno [55]

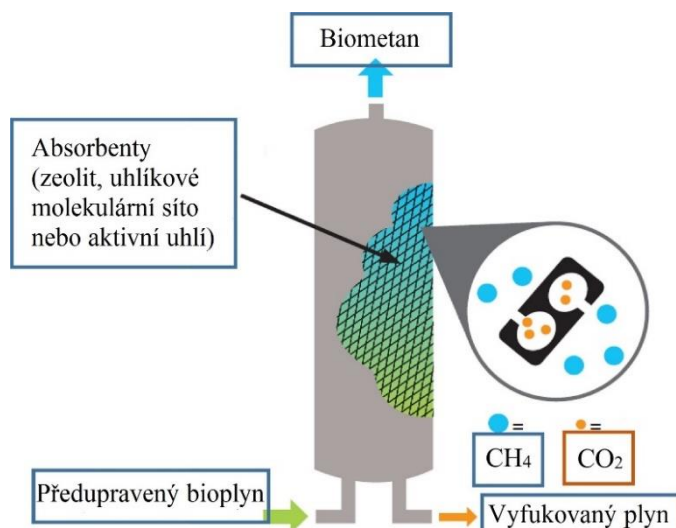
Konečný plyný produkt může obsahovat koncentraci CH₄ převyšující 99 % [46]. Ztráty metanu lze očekávat menší než 0,1 % [27]. Proces probíhá rychleji a za nižších tlaků v porovnání s HPWS. Technika vyžaduje vysoké investice a značnou tepelnou energii z důvodu regenerace rozpouštědla. Přítomnost H₂S v surovém bioplynu navyšuje potřebnou teplotu pro regeneraci, proto se doporučuje sulfan odstranit před procesem AS. Může se požadovat zpracování odpadních chemikálií. Další nevýhodou je koroze a nahromadění kontaminantů [46]. Toxicita rozpouštědel pro člověka a životní prostředí také vysoce znevýhodňuje tento způsob separace [27].

Kromě AS lze použít metodu chemické absorpce s použitím anorganických rozpouštědel, tedy technologii ISS (Inorganic solvent scrubbing), která využívá vodné roztoky alkalických solí jako jsou hydroxidy sodíku, draslíku, vápníku a amoniaku. Míchání alkalického roztoku podporuje absorpci CO₂. Vzniklé víření a doba kontaktu mezi

plynnou a kapalnou látkou zlepšuje difúzi CO_2 v rozpouštědle [46]. Technologie ISS je nákladově efektivnější a hojnější než AS [27].

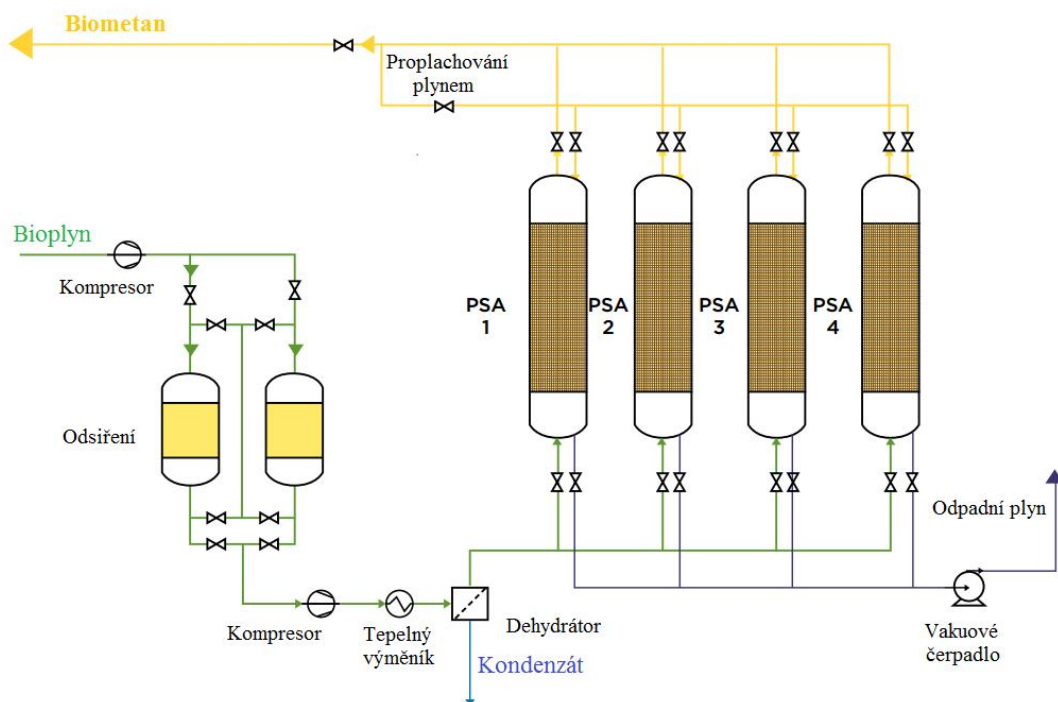
3.4.4 Technologie PSA (Pressure swing adsorption)

Adsorpce kolísáním tlaku separuje kontaminanty z bioplynu na základě jejich molekulárních charakteristik a afinity adsorbentu [27]. Nečistoty se v proudu plynu přenášejí na povrch adsorpčního materiálu vlivem van der Waalsových nebo fyzikálních sil. Používané adsorbenty by měly mít zásaditý povrch, aby snáze přitahovaly kyselé plyny jako je CO_2 . Velikost pórů se upravuje tak, aby molekuly oxidu uhličitého mohly snadno pronikat do struktury, kdežto CH_4 bude nucen projít skrze ně viz obr. 18. Další požadovanou vlastností je schopnost regenerace či desorpce za nízké spotřeby energie a dobrá způsobilost k odstranění vlhkosti [46]. Mezi používané adsorbenty patří aktivní uhlí, oxidy vápníku, zeolity, hydrotalcity a molekulární síta. Tyto materiály mají vysokou adsorpční kapacitu v důsledku svých velkých povrchových ploch a pórovitosti. Bioplyn by měl být předem odsířen, jelikož H_2S se adsorbuje nevratně a produkuje toxické účinky [42].



obr. 18: Základní princip PSA, upraveno [42]

Z důvodů lepší adsorpce je bioplyn na začátku procesu komprimován na 200–700 kPa a zchlazen přibližně na 70 °C. Vstřikování stlačeného plynu se provádí ze dna adsorpční kolony. Molekuly CO_2 jsou menší v porovnání s molekulami CH_4 , což způsobuje výraznější nahromadění CO_2 na povrchu či v pórech adsorbentu oproti metanu [42]. Zde také může adsorbent selektivně zadržovat další typické nečistoty bioplynu včetně H_2O , O_2 , N_2 a H_2S . Metan mezitím proudí skrz do horní části kolony, odtud může být následně akumulován snížením tlaku. Regenerace adsorpčního materiálu se uskutečňuje za sníženého tlaku desorpčním procesem v nasyceném adsorbéru. Během desorpce se uvolní zachycené plyny. Tato plynná směs obsahuje i významná množství CH_4 , a proto se odvede spodním úsekem nádrže prostřednictvím ventilu na vstup PSA ke znovu využití v procesu [27]. Další cyklus se zahájí naplněním adsorpčního sloupce bioplynem [42]. V praxi se obvykle instalují čtyři adsorpční věže paralelně vedle sebe k zajištění údržby a kontinuálního provozu. Jakmile dojde k nasycení adsorpčního materiálu, proud plynu se přivede do další kolony, kde bude děj pokračovat [27]. Technologie PSA je zobrazena na obr. 19.



obr. 19: Schéma technologie PSA, upraveno [54]

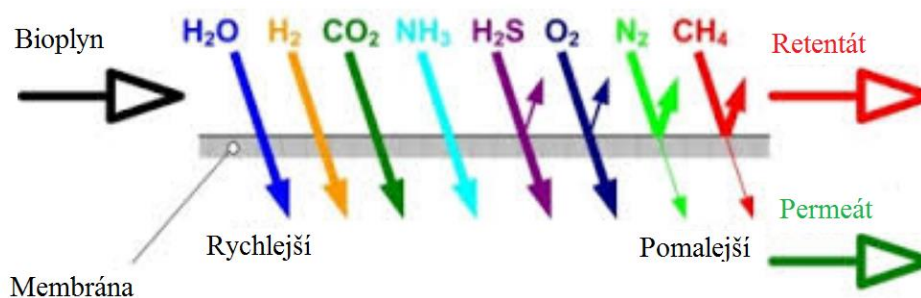
Produktem PSA je biometan o kvalitě blížíci se 96–98 %. Ztráty metanu činí 1,5–2,5 %, proto musí být dodatečně spalovány, aby se zamezilo uvolňování CH_4 do atmosféry [42]. Snížení ztrát z desorbovaného plynu lze podpořit recirkulací tohoto plynu do procesu PSA [46]. Technologie vyžaduje spíše nižší komplexní spotřebu energie, což z ní činí konkurenceschopnou metodu na zušlechťování bioplynu [42]. Na druhou stranu kvůli využívání více adsorpčních kolon paralelně v řadě se navýší náklady jak investiční, tak provozní [46].

Další obdobné technologie adsorbce založené na principu výkyvů jsou TSA (Temperature swing adsorption) a ESA (Electrical swing adsorption). V metodě TSA teplota narůstá při konstantním tlaku a k regeneraci adsorpčního materiálu se aplikuje tepelná energie. Za předpokladu levného zdroje energie by TSA byla lepší volbou pro upgrade bioplynu než PSA. Vhodné adsorpční materiály pro TSA jsou uhlíkové xerogelové mikrosféry a uhlíkové kryogenní mikrosféry vyznačující se stabilní strukturou a vysokou porézností. V procesu ESA k regeneraci dochází při průchodu elektrické energie skrze nasycený adsorbent a současně se generuje teplo vlivem Joulova efektu, což usnadňuje separaci CO_2 . Tedy aplikovaný adsorbent musí mít schopnost vést elektrický proud, a proto bylo vyvinuto polovodičové aktivní uhlí s velkým povrchem a značným množstvím mikropórů jako nový typ adsorbentu. Ve srovnání s TSA a PSA má tato metoda potenciál snížit náklady na zadržování oxidu uhličitého [46].

3.4.5 Membránová separace

Technologie membrány pracuje v podstatě jako propustná bariéra umožňující sloučeninám proudit skrz rozdílně. Propustnost jednotlivých složek bioplynu se řídí aplikovanými hnacími silami, tedy rozdílem tlaku, teploty, koncentrace a různých typů elektrických nábojů [46]. Například molekuly různých sloučenin v bioplynu pronikají

odlišnou rychlostí (obr. 20), seřazeno od nejpomalejší k nejrychlejší propustnosti takto CH_4 , N_2 , H_2S , CO_2 a H_2O [27]. Tuto rychlost stanovuje koeficient rozpustnosti a difúzní koeficient plyn/membrána [53]. Membrána propouští CO_2 jako permeát na svoji vnější stranu, zatímco vnitřkem dále proudí méně propustný metan jako retentát [46].



obr. 20: Základní princip membrány, upraveno [56]

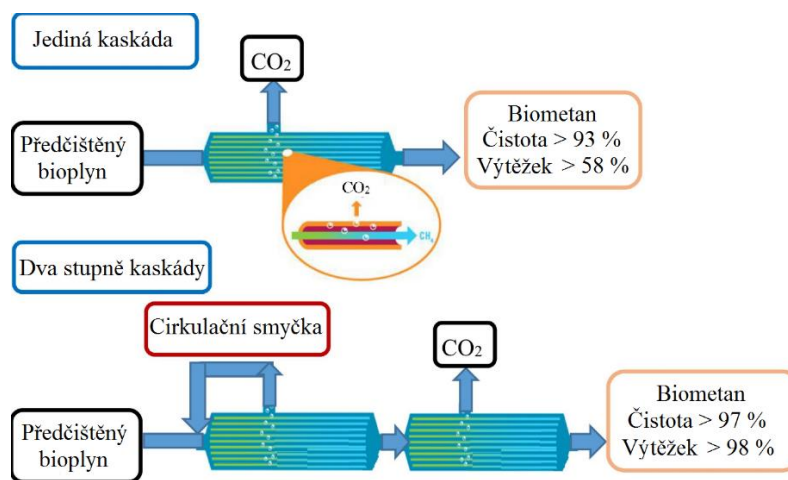
Typ a materiál membrány striktně stanovuje účinnost separace CO_2 . Aby byl bioplyn efektivně upraven na biometan s nejnižšími ztrátami CH_4 , musí mít membrána velký rozdíl v permeabilitě mezi CO_2 a CH_4 [27]. Obecně propustnost CO_2 je 20krát větší v porovnání s CH_4 [42]. Pro upgrade bioplynu se používají membrány anorganické a polymerní a smíšené matricové membrány (MMM) [46].

- Anorganické membrány – mezi typické materiály patří kov, zeolity, keramika a uhlík. Tyto materiály poskytují vyšší tepelnou stabilitu, výbornou schopnost separace plynů a odolnost proti chemikáliím. Hlavním nedostatkem těchto materiálů jsou špatné mechanické vlastnosti a obtížná zpracovatelnost [53]. Výroba anorganických kontinuálních bezchybných membrán je striktní proces, materiály sestávají z křehké struktury, a proto se například uhlíková membrána podporuje oxidem hlinitým či křemíkem ke zvýšení její pevnosti před zahájením pyrolýzy [46]. Důsledkem toho je produkce anorganických membrán nákladná [53].
- Polymerní membrány – většina se vyrábí z organických materiálů typu polysulfon, polyimid (PI), polykarbonát, polydimethylsiloxan a acetát celulózy (CA). Tyto materiály se vyznačují prvotřídní mechanickou pevností, vysokou selektivní permeabilitou a snadnou výrobou s nízkými náklady. Nejpoužívanějšími komerčními polymery pro separaci bioplynu jsou CA a PI. Membrány na bázi CA jsou relativně levné a pocházejí z celulózy, což je obnovitelný zdroj. Na druhou stranu organická sloučenina CA je citlivá na plastifikaci, ke které dochází už při tlaku 800 kPa. Vysoce krystalický materiál PI má vysokou permeabilitu, selektivitu a stabilitu (mechanickou a tepelnou). Například ke komerčně dostupnému PI patří značně nákladovější Matrimid®, který odolává plastifikaci do tlaku 1 700 kPa a drsnému prostředí [46].
- Membrány se smíšenou matricí (MMM) – jsou středem pozornosti dnešního vývoje, jedná se o integraci polymerních a anorganických membrán. Kompozitní MMM sestávají z kontinuální fáze (polymerního materiálu) s disperzní fází (anorganickými částicemi) [46]. Mezi typické disperzní částice se řadí zeolity, uhlíková molekulární síta (CMS) a kovově-organické rámce (MOF) [53]. Výsledné membrány by měly získat výhody polymerních i anorganických

materiálů a překonat tak omezení individuálních fází. MMM se vyznačují výbornou separační schopností, zvýšenou pevností v tahu, tepelnou stabilitou a možností aplikace v drsném prostředí [46].

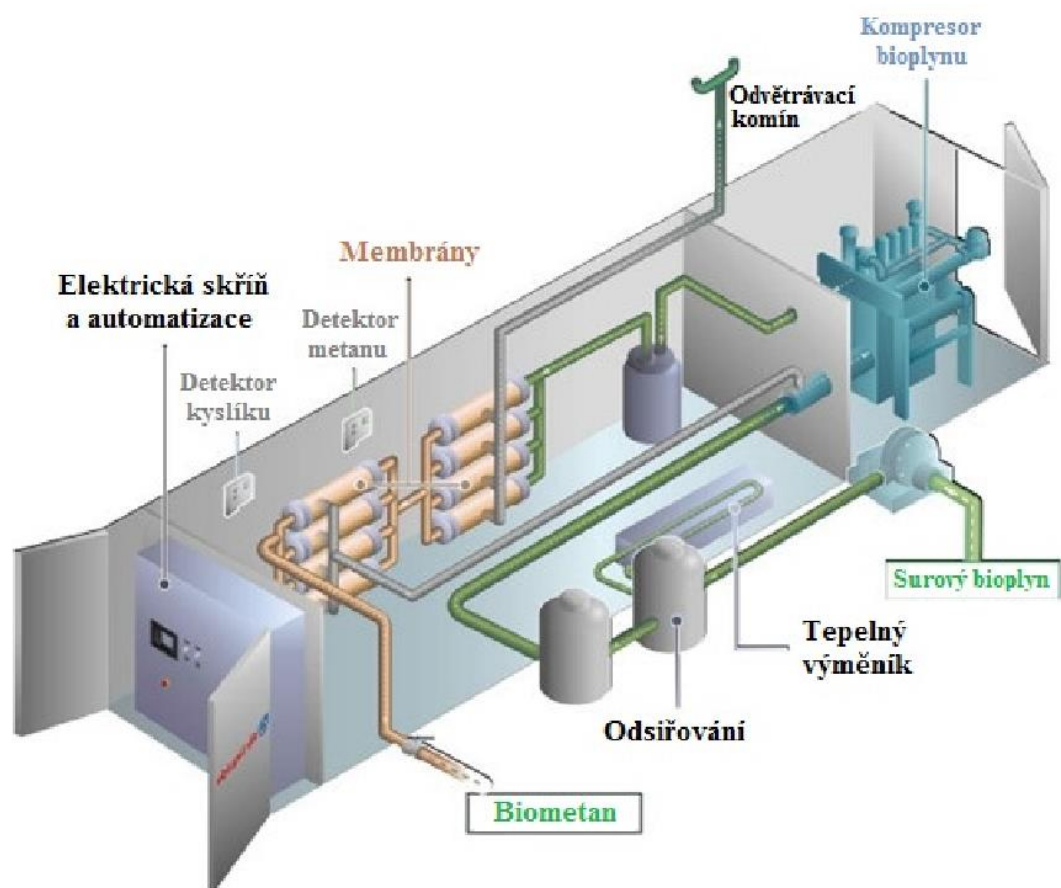
Před vstupem do membránové jednotky musí být bioplyn zbaven H_2S , H_2O , aerosolu a kapiček oleje [46]. Proces lze provádět dvěma základními systémy, buď se nachází plynná fáze uvnitř a vně membrány (Separace plyn–plyn), nebo rozptýlené molekuly jsou absorbovány kapalným médiem (Separace plyn–kapalina) [47]. Hlavní části modulu membránové technologie jsou zobrazeny na obr. 22.

- Separace plyn–plyn – převážně používá polymerní membrány z materiálu PI a CA. Oxid uhličitý se ve většině polymerních membrán rozpouští více než CH_4 . Proto plynná směs obsahující CO_2 a významnou část metanu dosahující i 10–15 % difunduje na stranu membrány s nižším tlakem, zatímco obohacený plyn o CH_4 zůstává v místě vyššího tlaku, tedy uvnitř membrány. Běžně se aplikují provozní tlaky v rozsahu 500–2 000 kPa [27]. V jednom kroku lze neupravený bioplyn vyčistit na kvalitu 92 % CH_4 , avšak při použití dvoustupňové či třístupňové kaskády koncentrace metanu může přesahovat 96 % [47]. Vysoké čistoty biometanu lze tedy docílit spojením jednotlivých svazků trubek do vícestupňové kaskády. Dvoustupňová kaskáda produkuje plyn s vyšší koncentrací CH_4 a současně udržuje vyšší výtěžek v porovnání s jedinou kaskádou viz obr. 21. Ve dvoustupňové kaskádě se plyn recirkuluje z první membrány zpět na její vstup, zatímco sekundární membránou prochází plyn obohacený CH_4 [42].



obr. 21: Fyzikální a technický princip membránové separace, upraveno [42]

- Separace plyn–kapalina – využívá k oddělení plynné a kapalně fáze mikroporézní hydrofobní membránu. Kapalina a bioplyn proudí v opačných směrech, během tohoto procesu molekuly z plynu schopné difundovat skrze membránu se absorbují do kapaliny. Mírným natlakováním plynu se zabraní kapalině pronikat do oddělené části s plynem. Provozní tlak absorpční membrány činí 100 kPa, což téměř odpovídá atmosférickému tlaku. K upgradu bioplynu se používá roztok aminu, který umožňuje získat v jednom kroku plyn s koncentrací větší než 96 % CH_4 . Regenerace sloučeniny aminu lze uskutečnit zahříváním, současně se produkuje vysoce čistý CO_2 vhodný k dalším aplikacím [47].



obr. 22: Modul pro upgrade bioplynu – provozní princip, upraveno [57]

Z technologie membránové separace lze využít i odpadní plyn obohacený o CO_2 k výrobě vysoce čistého oxidu uhličitého, který lze následně využít třeba v potravinářském průmyslu. Kvalitní produkt s 99,9 % CO_2 lze získat použitím pětistupňové kaskády a následným zchlazením odpadního plynu na $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Ochlazení eliminuje O_2 , N_2 a pozůstatky CH_4 [42].

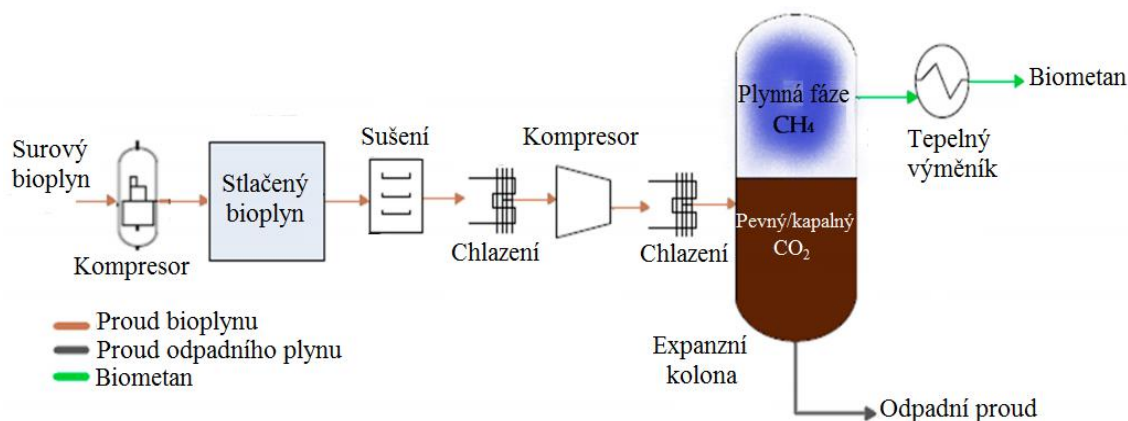
Tato jednoduchá a značně spolehlivá technologie nevyžaduje větší množství investičních či provozních nákladů. K údržbě zařízení nejsou zapotřebí žádné nebezpečné chemikálie [46]. Modulární a kompaktní design s méně pohyblivými částmi se řadí k hlavním výhodám membránové metody, která je stále v rozvoji. Naopak tuto metodu znevýhodňují omezené praktické zkušenosti [42]. Membrány pro zušlechťování bioplynu jsou vysoce nákladné a křehké, jejich životnost se odhaduje na 5–10 let. Ztráty metanu během procesu nepřekračují 0,6 % [27].

3.4.6 Kryogenní destilace

Princip technologie se opírá o rozdílné tlakové a teplotní podmínky, které jsou zapotřebí ke zkvalitnění CO_2 , CH_4 a případně dalších kontaminantů. Metoda pracuje za velmi nízkých teplot dosahujících až $-170\text{ }^\circ\text{C}$ a za relativně vysokých tlaků pohybujících se okolo 8 000 kPa. Bod varu za atmosférického tlaku pro CO_2 se nachází na $-78,2\text{ }^\circ\text{C}$, zatímco u metanu je bod varu mnohem nižší, a to až $-161,5\text{ }^\circ\text{C}$. Tento rozdíl se tedy využívá k odloučení CO_2 od CH_4 . Aby bylo možné udržet podmínky separace, musí být zařízení vybaveno několika výměníky tepla a kompresory. Před uvedením bioplynu do procesu

kryogenní separace se doporučuje odstranit H_2O a H_2S . Tím se zabrání nahromadění zamrzlé vody způsobující ucpání systému, což by vedlo ke snížení provozního tlaku [46].

Komplexní systém technologie zahrnuje obecně čtyři základní kroky umožňující získat biometan v kvalitě zemního plynu. Na začátku se ze surového bioplynu eliminuje H_2O , H_2S , siloxany, pevné částice, halogeny a další nečistoty. V následujícím kroku se bioplyn nejdříve komprimuje na 1 000 kPa a potom se ochlazuje na teplotu $-25\text{ }^\circ\text{C}$. Třetí krok také slouží k ochlazení plynné směsi, ale tentokrát se s teplotou klesá na hodnotu $-55\text{ }^\circ\text{C}$. V tomto stavu se odstraní z bioplynu CO_2 zkapalněním [46]. Zkapalněné CO_2 pracuje jako rozpouštědlo schopné oddělit zbývající kontaminanty z plynu [47]. Jako poslední krok se provede chlazení zbytkového plynu do $-85\text{ }^\circ\text{C}$. Zde se oxid uhličitý přemění na pevnou fázi a oddělí se [46]. Plynnou fázi CH_4 lze izolovat od pevné složky CO_2 procesem rektifikace [42]. Následující obr. 23 zobrazuje základní schéma kryoseparace.



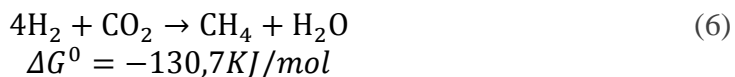
obr. 23: Schéma kryogenní destilace, upraveno [58]

Kryogenní destilace pro upgrade bioplynu se řadí k novějším rozvíjejícím se technologiím. Existuje jen několik komerčních závodů, které ji využívají v provozu. Zásadní nevýhodou metody jsou vysoké investiční a provozní náklady v důsledku velkého množství technologických jednotek (např. turbín, destilačních kolon, tepelných výměníků a kompresorů) s vysokou spotřebou energie [46]. Spotřebovaná energie během procesu odpovídá asi 10 % vyprodukovaného CH_4 [42]. Vyšší koncentrace pevného skupenství CO_2 může způsobit ucpání soustavy [27].

Předností kryogenní separace je naopak vysoká čistota CO_2 a CH_4 dosahující až 99,9 % se ztrátami metanu pod 1 % [42]. Technologie je výhodná pro přímou produkci BioLNG, jenž má podobné složení jako zkapalněný zemní plyn [47]. Ke zkapalnění biometanu dochází při teplotě $-125\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku 1 500 kPa za využití znovuzískané energie z počáteční kondenzace bioplynu. Tímto způsobem se minimalizuje potřebná energie v jednotlivých krocích. Podobným způsobem lze zmrazit i CO_2 , který se využívá v určitých průmyslových odvětvích jako suchý led. Synergie má tak za následek zvýšenou konkurenceschopnost na trhu [42].

3.4.7 Chemoautotrofní technologie

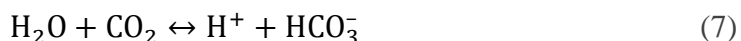
Chemoautotrofní metody jsou založeny na aktivitě hydrogenotrofních metanogenních bakterií, které využitím vodíku konvertují oxid uhličitý na metan dle následující stechiometrické rovnice [27]



Z uvedené rovnice (7) vyplývá, že přísun vodíku do systému bioplynu by měl být v poměru 4:1 s oxidem uhličitým [59]. Aby se tento způsob upgradu bioplynu mohl řadit k obnovitelným zdrojům energie, ke zmíněné reakci by měl být aplikován obnovitelný vodík. Předností biotechnologie je možnost ukládání přebytečné energie získané prostřednictvím solární a větrné elektrárny. Baterie využívané k uskladnění elektrické energie znevýhodňuje jejich nízká kapacita, vysoké produkční náklady a téměř vždy obsahují nebezpečné chemické látky. Vodík získaný elektrolýzou vody pomocí obnovitelné elektřiny se považuje za čistý zdroj energie s nulovými emisemi CO_2 . Naopak k jeho nevýhodám patří například nízká objemová hustota energie, která ztěžuje jeho skladovatelnost. Propojení energie z fotovoltaických panelů či větrných turbín s bioplymem činí chemoautotrofní technologii velmi atraktivní. Tento proces se jeví jako nadějný prostředek k transformaci elektřiny na energetický nosič (metan), který lze nenáročně skladovat v plynové infrastruktuře. Kapacita energie v CH_4 čítá 36 MJ/m^3 , což je přibližně trojnásobek energie obsažené ve vodíku [27].

Biotechnologii lze realizovat v současných BPS, s tím se vážou nižší počáteční investice. V chemoautotrofním procesu se CO_2 neodděluje ani neabsorbuje, ale převádí se na CH_4 . Výsledkem je tedy značně vyšší konečná energetická hodnota biometanu. Konfigurace chemoautotrofní technologie se dělí na tři kategorie (obr. 24), přesněji na in – situ, ex – situ a hybridní koncept. Ze zmíněných technologií jsou již experimentálně ověřeny in – situ a ex – situ, zatímco hybridní koncept se aktuálně nachází v počáteční fázi vývoje [27].

- In – situ koncept – samotný vodík se přivádí do fermentoru BPS, kde reaguje s endogenním CO_2 produkovaným anaerobním procesem za vzniku CH_4 působením metanogenů. Vhodnými provozními podmínkami (teplota, hodnota pH atd.) lze získat výtěžek metanu o čistotě 99 %. Hlavní výzvou této metody je zvýšení pH nad hodnotu 8,5, kdy dochází k inhibici metanogeneze. Nárůst pH totiž eliminuje z bioplynu hydrogenuhlíčan, který patří k nejdůležitějším faktorům ve fermentačním procesu. Jak uvádí níže rovnice (7), oxid uhličitý společně s vodou se přeměňuje na H^+ a HCO_3^- . Využití CO_2 zapříčiní úbytek H^+ za současného zvýšení pH ve fermentoru [27].

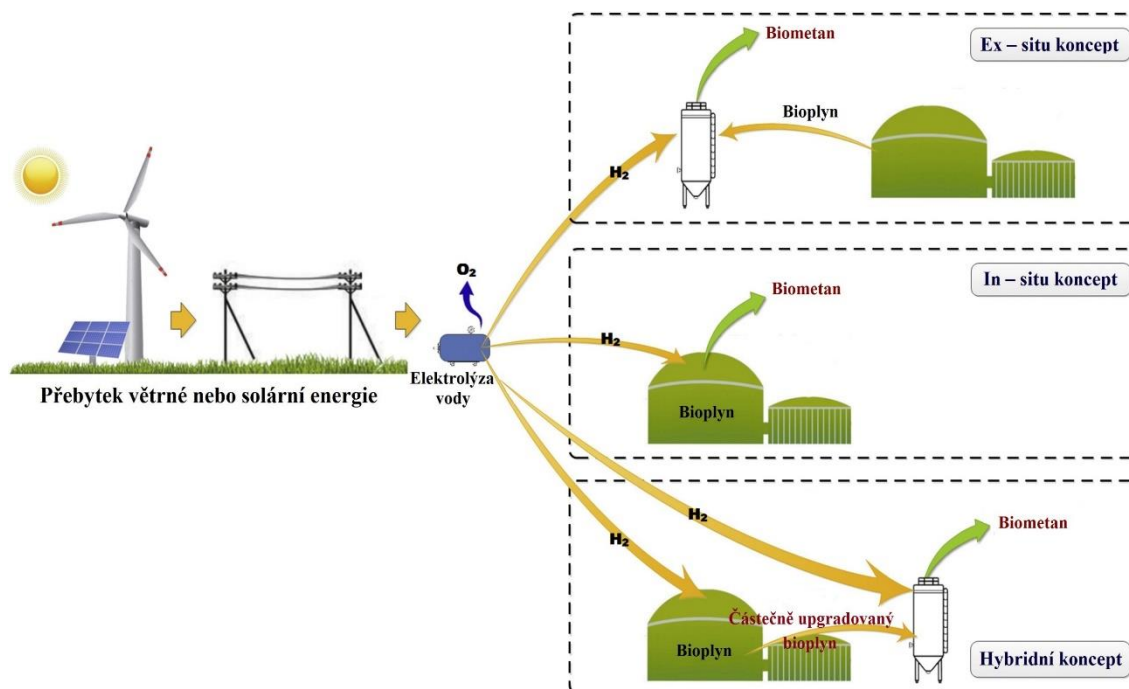


Optimální proces biologické výroby metanu by tedy neměl překročit pH 8,5 při mezofilních i termofilních podmínkách. Například optimální rozsah pH v celém průběhu zušlechťování bioplynu lze udržovat za využití hnoje se syrovou syrovátkou odpadní vody jako vstupní suroviny [27].

- Ex – situ koncept – reakce oxidu uhličitého obsaženého v bioplynu s vodíkem probíhá v samostatné koloně, která je obohacená kulturou hydrogenotrofních bakterií, což následně vede k produkci biometanu. K přednostem metody se řadí stabilita degradace biomasy na plynou směs, protože zušlechťování bioplynu probíhá v externí jednotce, dále v průběhu biochemického procesu nedochází k jednotlivým krokům anaerobní fermentace, tedy děj je jednodušší. Účinnost

biometanizace z velké části závisí na provozní teplotě. Termofilní kultura poskytuje o více než 60 % vyšší přeměnu H_2 a CO_2 na metan ve srovnání s mezofilními podmínkami. Nezávisle na teplotě, doba adaptace je nutným předpokladem pro kulturu mikroorganismů, aby plyny oxidu uhličitého a vodíku vznikaly efektivněji. Například v mezofilním zkrápěném reaktoru obohaceného imobilizovanou kulturou hydrogenotrofních metanogenů lze získat po 8 měsících provozu biometan o čistotě 96 %. Tato biometanizace má srovnatelnou efektivnost s termofilním procesem. Zkrápěné reaktory jsou schopné poskytnout účinnost konverze H_2 a CO_2 až 98–99 % CH_4 [27].

- Hybridní koncept – vytváří integrovaný systém pro upgrade bioplynu pomocí společné implementace biotechnologií in – situ a ex – situ. První fáze hybridní technologie probíhá v původním konceptu in – situ, kde se zušlechťuje bioplyn na kvalitu např. 80–90 % metanu. V sekundární fázi se aplikuje proces ex – situ, v němž se obohacený bioplyn z prvního kroku dočistí na koncentraci CH_4 větší než 98 %. Hybridní systém dokáže řešit problém s narůstáním pH během procesu in – situ a pro koncept ex – situ je postačující podstatně méně rozměrná externí kolona [59].



obr. 24: Schéma chemoautotrofní technologie, upraveno [27]

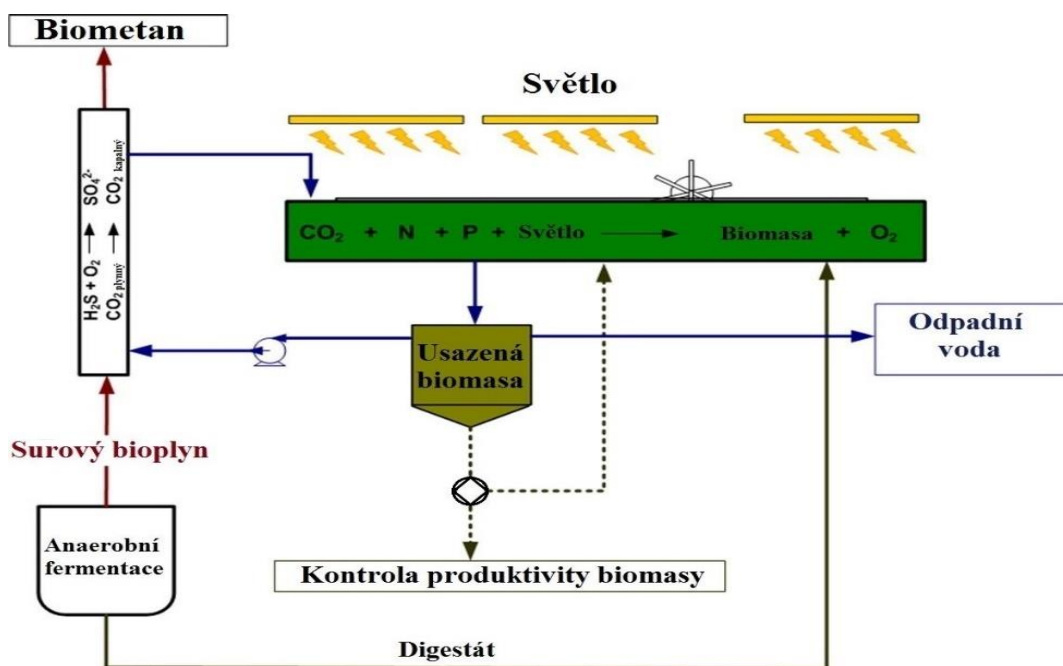
3.4.8 Fotoautotrofní technologie

Tato biotechnologie k eliminaci CO_2 z bioplynu je založena na působení fototrofních organismů, které zde zastávají funkci katalyzátoru [27]. Oxid uhličitý je zdrojem uhlíku, jenž podporuje mikrobiální růst. Mezi používané organismy patří například mikrořasy, které zachycují energii ze slunečního záření, vykazují značně rychlý růst a jsou adaptovatelné na prostředí za všelijakých podmínek. Během procesu se CO_2 pomocí mikrořas nejen odstraní, ale navíc se konvertuje na organickou hmotu. Tato biomasa jako

vedlejší produkt může být nadále zpracovávána v BPS za účelem výroby dalšího bioplynu [60]. Metoda dále umožňuje odstranit z plynné směsi H_2S oxidací na síran pomocí sirných bakterií za podpory fotosynteticky vyrobeného kyslíku [61].

Mikroorganismy se během procesu nachází v uzavřených či otevřených fotobioreaktorech. Uzavřené systémy se vyznačují vysokým výkonem fotosyntézy a nízkými nároky na potřebu půdy a vody. Na druhou stranu je znevýhodňují značné investiční a energetické náklady. Otevřené fotobioreaktory naopak mají nižší pořizovací náklady, ale jsou schopné absorbovat menší množství fotosyntetického CO_2 a vzhledem k přírodním zdrojům se kladou vyšší požadavky [27].

Přísun bioplynu se při procesu upgradu provádí vstřikem přímo do fotobioreaktoru, anebo externě do absorbéru, kde proud živného roztoku z mikrořas se recirkuluje z hlavní nádrže. V další fázi fotoautotrofní mikroby (např. sinice či mikrořasy) absorbují oxid uhličitý za podpory sluneční energie, H_2O a živin potřebných k tvorbě organické hmoty, O_2 a tepla, tím se tedy navyšuje koncentrace metanu [27]. Fotosyntetické organismy mají schopnost uskutečnit oxygenní fotosyntézu, tedy 1 mol zachyceného CO_2 vede k uvolnění 1 molu O_2 . Oxid uhličitý se absorbuje v uzavřeném fotobioreaktoru, zatímco kyslík je uvolňován do bioplynu. Kyslík obsažený v bioplynu se musí snížit na nejnížší možnou míru, aby se zabránilo vzniku výbušné směsi s CH_4 [60]. Zde vznikající anaerobní odpadní vody lze využít k podpoře růstu mikrořas, což vede ke snížení nákladů na jejich zpracování a eutrofizaci [61]. Obr. 25 ilustruje schéma fotoautotrofní technologie.



obr. 25: Schéma fotoautotrofní technologie, upraveno [61]

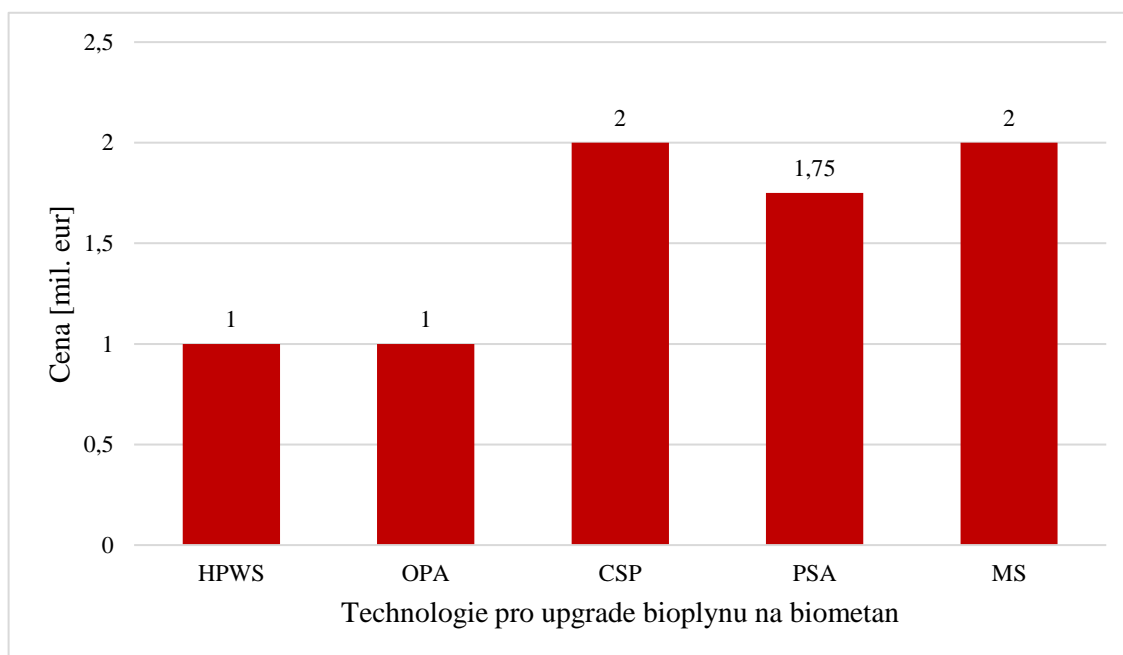
Tyto biometody umožňují spotřebovat více než 54 % CO_2 a také eliminovat H_2S [27]. Technologie vyžaduje, aby složení bioplynu nezpůsobovalo inhibici nebo toxicitu mikroorganismů [60]. Bioplyn s obsahem sulfanu okolo 0,01 % může být toxický k řasám a nadbytek oxidu uhličitého způsobuje snížení pH, což vede ke zpomalení růstu mikrořas. Výtěžek metanu je podmíněn typem zušlechťovacího systému a aplikovaných fotoautotrofních mikroorganismů, při optimálních podmínkách výnos CH_4 dosahuje až 97 % [27].

3.5 Porovnání komerčních technologií pro upgrade bioplynu

Aktuálně k technologiím pro eliminaci oxidu uhličitého z bioplynu na úrovni komerční připravenosti se řadí výrobní procesy zahrnující vysokotlaké čištění vodou, fyzikální čištění organickými rozpouštědly, chemickou absorpci, adsorpci kolísáním tlaku a membránovou separaci [27]. Přímé porovnání těchto technologií není realizovatelné, protože jejich výběr je podmíněn kvalitou produkovaného biometanu, ztrátami CH_4 během procesu, energetickou spotřebou, investičními a provozními náklady a několika dalšími okolnostmi. Lze tedy alespoň do jisté míry provést srovnání jednotlivých, již zmíněných, faktorů [42].

3.5.1 Ekonomika

Při volbě zařízení pro upgrade bioplynu mohou hrát klíčovou roli právě kapitálové a provozní náklady. Uvedený graf 5 níže představuje odhadované investice pro technologie různého typu s předpokládaným průtokem $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ [42].

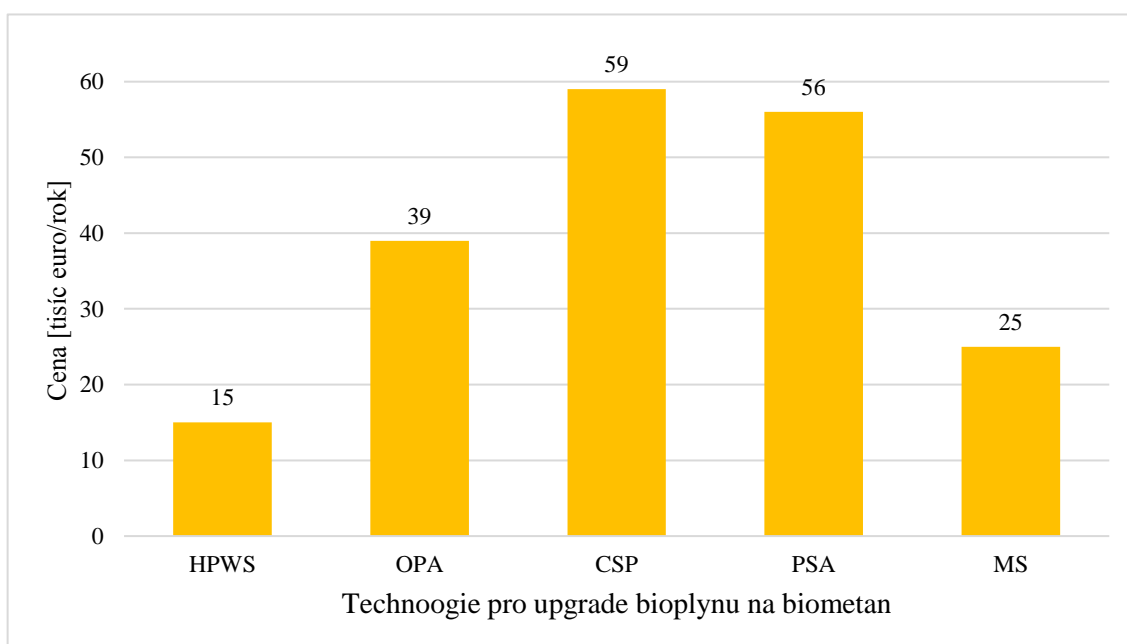


graf 5: Odhadované kapitálové náklady různých technologií s kapacitou $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ [42]

Z grafu 5 vyplývá, že nejnižší počáteční pořizovací náklady čítající 1 mil. eur mají společně dva představitelé absorpčních technologií, a to HPWS a OPA. Naopak ve srovnání s nimi jsou výdaje u CSP (chemical scrubbing process) a membránové separace dvojnásobné. Mezi nákladnější technologie se řadí i PSA, která má nižší investice jen o 0,25 mil. eur než nejdražší metody. Z dostupných dat o kapitálových nákladech plyne, že jsou úzce nepřímě úměrné velikosti biometanové stanice, tedy čím větší zařízení je provozováno, tím nižší kapitálové náklady na jednotku produkovaného bioplynu se vyžadují [7]. Dále platí, že u méně kapacitního zařízení se vyžaduje víceméně srovnatelné množství potřebných zařízení, senzorů řídicího systému, ventilů k regulaci a potrubního vedení jako u zařízení s vyšší kapacitou. Menší rozměry potrubí vedou k vyšším měrným

investičním nákladům. Tudiž s rostoucí kapacitou zařízení klesají měrné kapitálové náklady různých technologií [46].

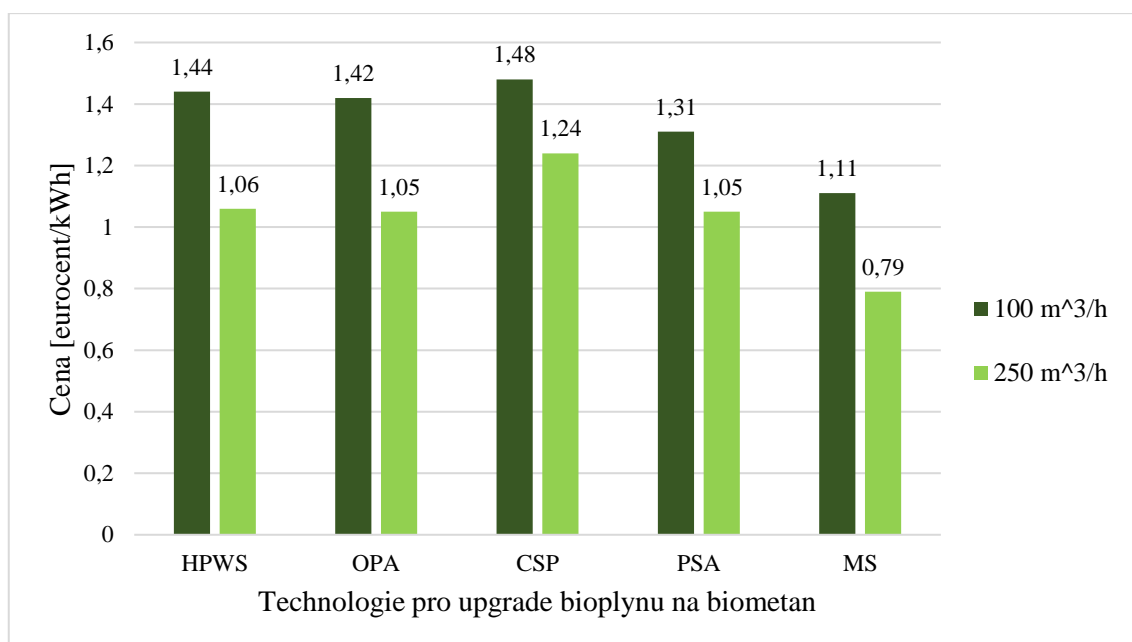
Provozní náklady zahrnují především výdaje na spotřebu elektrické energie, vodu nebo chemické látky, práci a údržbu [7]. Jedním z hlavních faktorů ovlivňujících volbu technologie pro zušlechťování bioplynu jsou náklady spojené s údržbou, jelikož značně přispívají k celkovým provozním nákladům [46]. Níže graf 6 porovnává přibližné náklady potřebné na provoz a údržbu odlišných výrobních metod poskytujících stejnou kapacitu 1000 Nm³/h [42].



graf 6: Odhadované celkové provozní náklady pro různé technologie s průtokem 1000 Nm³/h [42]

V grafu 6 lze vyčíst, že nejméně nákladný provoz vykazuje technologie vysokotlaké vodní vypírky, a to s pouhými 15 000 eury ročně, což je o 10 000 eur za rok méně než u druhé provozně nejlevnější metody založené na membránové separaci. Nejvyšší náklady na zajištění provozu má chemická absorpce. Důvodem těchto vysokých výdajů technologie CSP může být značná spotřeba rozpouštědla [7],

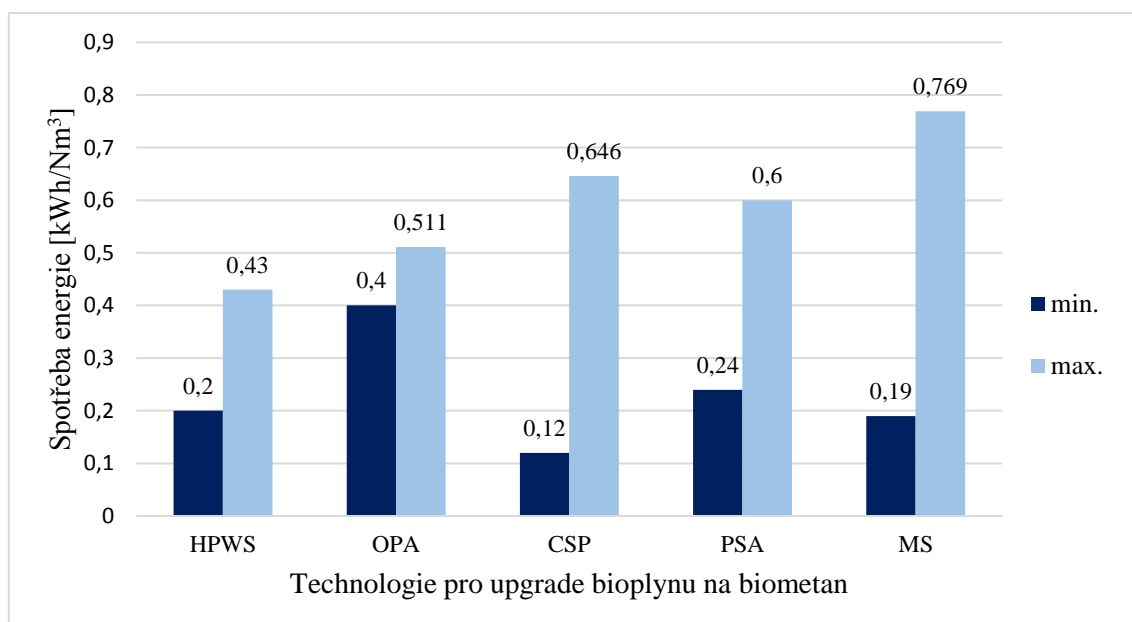
Jak již bylo zmíněno, kapitálové náklady na jednotku vyrobeného bioplynu klesají s rostoucí kapacitou zařízení. Stejná situace platí i pro provozní náklady. Následující graf 7 zobrazuje potenciální cenu za kWh spotřebované energie pro zařízení odlišného typu, poprvé s kapacitou 100 m³/h a poté s 250 m³/h [7].



graf 7: Provozní náklady v závislosti na spotřebě energie různých technologií [7]

Z výsledků uvedených v grafu 7 se potvrzuje pokles ceny se vzrůstem kapacity zařízení pro všechny skupiny technologií. Například u membránové separace lze zaznamenat snížení nákladů z 1,11 eurocent/kWh (100 m³/h) na 0,79 eurocent/kWh (250 m³/h), rozdíl tedy čítá 0,32 eurocent na kWh [7].

V souvislosti s předchozím grafem 7 je vhodné poznamenat, jak velké množství energie se spotřebuje na 1 Nm³ upravovaného bioplynu. Graf 8 shrnuje možný rozsah energetické spotřeby na jednotku objemu zpracovaného plynu různých technologických skupin [46].



graf 8: Spotřeba energie na jednotku objemu plynu jednotlivých technologií [46]

Z grafu 8 vychází, že k levnějším výrobním postupům patří fyzikální absorpce (čištění vodou a organickými látkami) v souladu se spotřebou energie pohybující se v rozmezí

0,2–0,43 kWh/Nm³ u HPWS a 0,4–0,511 kWh/Nm³ pro OPA. Metoda adsorpce založená na tlakových výkyvech má rozsah 0,24–0,6 kWh/Nm³, v porovnání s technologiemi fyzikální a chemické absorpce je méně konzistentní. Důvodem vysoké variability a vyšší finanční nákladnosti může být velký výběr adsorbentů aplikovaných v procesu, přičemž každý z nich potřebuje jiné množství energie pro regeneraci. Podobnou situaci vykazuje proces čištění pomocí chemických látek, kde velká difference ve spotřebě energie vzniká v závislosti na značné konzumaci tepla během regenerace aminového absorbentu. Membránová separace pro eliminaci CO₂ využívá různé provozní tlaky a materiály membrán, což má za následek velkou variaci energetické spotřeby [46].

3.5.2 Přehled výhod a nevýhod

Technologie pro upgrade bioplynu vhodné k implementaci do praxe lze analyzovat a porovnávat z různých aspektů. Níže tab. 3 nabízí přehled některých silných a slabých stránek jednotlivých metod, které mohou ovlivnit její výběr. Jedná se zejména o čistotu produkovaného biometanu, úniky CH₄ během procesu, finanční náklady, provozní tlaky a teploty, použití chemikálií, možnost separace dalších plynů apod. Toto shrnutí bylo provedeno na základě informací uvedených v podkapitole 3.4.

Metoda	Přednosti	Nevýhody
HPWS	<ul style="list-style-type: none"> Koncentrace CH₄ > 97 % Ztráty CH₄ < 2 % Separace CO₂ i H₂S Žádné chemikálie v procesu Provozní teplota: 40 °C Regenerace vody při 100 kPa Cena absorbentu Nastavitelnost kapacity prostřednictvím tlaku a teploty Nižší komplexní investiční a provozní náklady 	<ul style="list-style-type: none"> Velká spotřeba energie Vysoké vstupní tlaky: 0,6–1 MPa Značná spotřeba vody Možná koroze vlivem H₂S
OPA	<ul style="list-style-type: none"> Koncentrace CH₄ > 97 % Ztráty CH₄: 2–4 % Eliminace CO₂, H₂S, H₂O, O₂, N₂ a halogenderivátů Provozní teploty: 20–40 °C Regenerace rozpouštědla při tlaku 100 kPa Nižší celkové investiční náklady 	<ul style="list-style-type: none"> Vyšší energetická spotřeba Vstupní tlaky: 0,6–0,8 MPa Cena rozpouštědla (dražší než voda) Obtížnost regenerace absorbentu Manipulace s rozpouštědly
CSP	<ul style="list-style-type: none"> Koncentrace CH₄ > 99 % Velmi nízké ztráty CH₄: < 0,1 % Odstranění CO₂ i H₂S Vyšší absorpce CO₂ Vstupní tlaky: 100–200 kPa Regenerace absorbentu při tlaku 150–300 kPa Rychlejší proces než HPWS 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké teploty regenerace: 120–160 °C Odpadní chemikálie Koroze a hromadění kontaminantů Toxicita a cena rozpouštědla Vyšší celkové investice a provozní náklady
PSA	<ul style="list-style-type: none"> Koncentrace CH₄ > 96 % Ztráty CH₄: 1,5–2,5 % Separace CO₂ H₂O, O₂, N₂ a H₂S Regenerace adsorbentu Nižší spotřeba energie Provozní teplota: 70 °C Nízké tlaky při regeneraci 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké investiční a provozní náklady (kvůli počtu adsorpčních kolon) Eliminace H₂S před procesem, aby se zabránilo vzniku toxicity Vstupní tlaky: 0,2–0,7 MPa
MS	<ul style="list-style-type: none"> Koncentrace CH₄ > 96 % Velice nízké ztráty CH₄: < 0,6 % Žádné nebezpečné chemikálie Modulární a kompaktní design Nižší komplexní provozní náklady Tlaky způsobu separace plyn/kapalina: 100 kPa Produkce i vysoce čistého CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Provozní tlaky separace plyn/plyn: 0,5–2 MPa Omezené praktické zkušenosti Cena membrán Potřeba více stupňů membrán k získání vysoké kvality plynu Nízký výtěžek CH₄ v jednom kroku Vyšší kapitálové náklady

tab. 3: Výhody a nevýhody komerčních technologií pro upgrade bioplynu

3.6 Využití biometanu

Zušlechtěný surový bioplyn, který získal vlastnosti srovnatelné se zemním plynem, se nazývá biometan. Tím tedy vzniká ekologická alternativa zemního plynu z biomasy. Mezi aplikace biometanu jako biopaliva patří jeho spalování v domácích kamnech, v kotlích a v motorech dopravních vozidel a vstřikování do rozvodné plynárenské soustavy [7]. Využívání zeleného plynu v různých oblastech v posledních letech nabíralo na významu, důvodem je nízká kvalita a vyčerpání zdrojů fosilního plynu [46].

3.6.1 Vytápění a plynové kotle

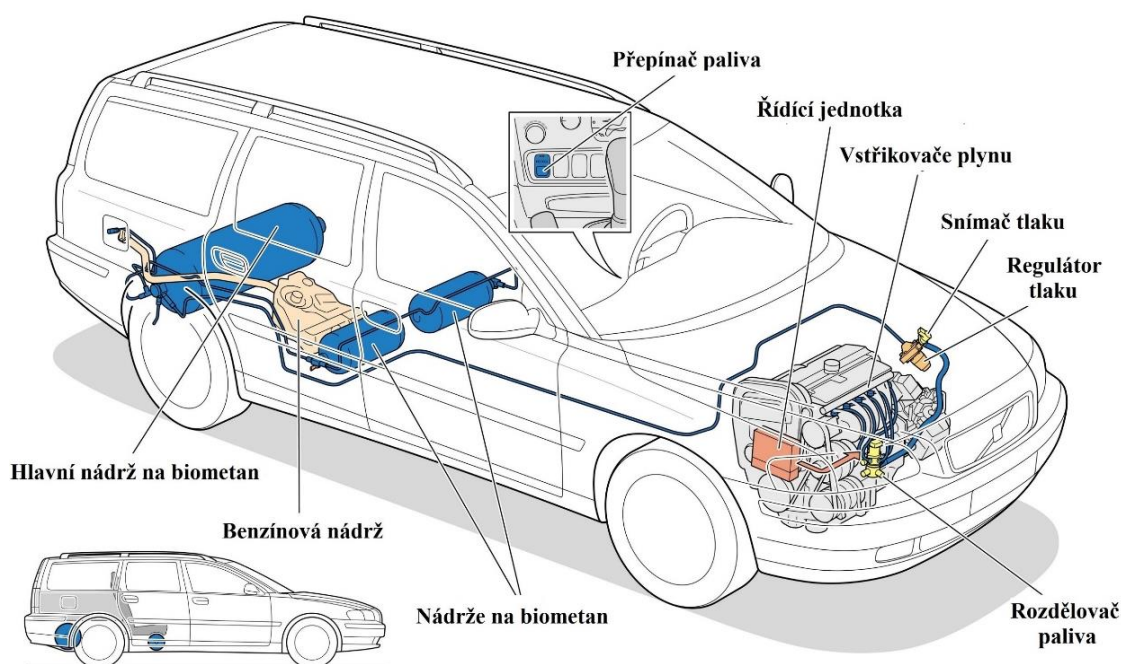
Běžně se používá zemní plyn pro spalování v domácích kamnech. Biometan může být alternativním palivem k zemnímu plyn, pokud splní patřičné normy vzhledem k bezpečnému a racionálnímu využití. Zemní plyn se typicky dodává do domácích kamen pod tlakem přibližně 2 kPa. Velikost zmíněného tlaku poskytne výrazně vyšší výhřevnost zemního plynu v porovnání s výhřevností ekologičtějšího biometanu. Jestliže má být zemní plyn nahrazen biometanem v domácích kamnech bez nutnosti dodatečných montážních úprav, koncentrace CH_4 v zeleném plynu musí odpovídat bezmála 100 %. Biometan lze aplikovat s nižším obsahem CH_4 za zvýšeného vstupního tlaku. Například při koncentraci 93 % metanu je potřeba použít tlak 100 kPa. Dále se musí udržovat nízký obsah H_2S , aby se zabránilo korozi a výskytu toxických látek. Obvykle tedy hodnota H_2S nepřekračuje jednu tisícinu procenta [7].

Biometan lze spalovat i v kotli, který značně toleruje jeho kvalitu. Principiálně je možné spalovat ve spalovacím kotli pouze bioplyn bez upgradu. Dnes má většina kotlů vybavení na odsiřování kouřových plynů, tedy není nutná separace H_2S z bioplynu před jeho použitím [7]. Avšak koncentrace H_2S by neměla přesahovat 0,1 %. Naopak se doporučuje eliminace H_2O , aby se zamezilo vzniku koroze na tryskách kotle [52].

3.6.2 Alternativní palivo pro dopravu

Aplikace biometanu jako pohonné hmoty v odvětví dopravy vzbudil kolosální zájem na celém světě, a to především ve Švýcarsku a Švédsku. Dopravní prostředky je možné upravit na systém duálního paliva, kdy se jeden režim používá pro CNG. Dnes jsou komerčně dostupná zařízení umožňující přestavbu motorů spalující benzín na CNG. Stejným způsobem lze provést i přeměnu benzinových motorů na zelený plyn. Postup konverze a plynová souprava montovaná do vozidla pro použití zemního plynu a biometanu je totožná, tím tedy vzniká snadno proveditelná substituce zemního plynu biopalivem v odvětví dopravy [52].

Automobil tak může jezdit na benzin i biometan (obr. 26), aniž by se ve větší míře měnila jeho výkonnost a účinnost. Vzdálenost dojezdu takového vozidla pouze na biometanovou nádrž se pohybuje v rozsahu 400–500 km [54]. BioCNG má nižší hustotu energie v porovnání například s benzinem za stejných objemových podmínek, tedy vozidla na stlačený biometan mají kratší maximální jízdní dosah [52].



obr. 26: Automobil s duálním palivovým systémem, upraveno [62]

Upravený bioplyn může pohánět lehká i těžká nákladní vozidla. Spalování CNG a biometanu v lehkých nákladních vozidlech nevyžaduje žádné úpravy ve srovnání s těžkými nákladními vozidly, která mohou ke správnému fungování požadovat menší modifikace [52]. Plynovými motory jsou většinou vybavena užitková vozidla (dodávky), autobusy městské hromadné dopravy a nákladní automobily městské služby pro manipulaci s odpady [54].

Do místa čerpací stanice lze biometan dopravit prostřednictvím plynárenské sítě a v situaci, kdy plynovod není k dispozici v místě biometanové stanice, se transport provádí nákladními vozidly. Převoz či skladování se obvykle provádí ve vysokotlakých zásobnících, kde plyn je stlačen na 20–25 MPa. Biometan lze také zkapalnit, čímž dojde ke zvýšení hustoty energie, a následně transportovat pomocí těžkých vozidel či lodní dopravy. Tato metoda je vhodná pouze pro přepravu na vysoké vzdálenosti [54].

3.6.3 Vstřikování do sítě zemního plynu

Vtláčení biometanu do distribuční plynárenské soustavy je další vyvíjející se alternativa jeho využití. Nadbytečný biometan, který nelze využít v místě jeho výroby, se může vstřikovat do sítě zemního plynu za účelem dálkové přepravy a použití na vzdálených místech. Vhodný systém přepravy, distribuce, dávkování a využití biometanu je zajištěn stávající infrastrukturou zemního plynu, která se vyskytuje téměř v každé části světa. Plynárenská síť také slouží pro neomezené skladování biometanu. Upravený bioplyn z distribuční sítě lze následně aplikovat tam, kde se využívá běžné plynné fosilní palivo [52].

Biometan před zavedením do systému zemního plynu čelí několika výzvám. K největší výzvě patří skutečnost, že síť obvykle vlastní vláda či soukromá plynárenská organizace. Vlastníci tedy požadují zaručenou kvalitu biometanu (tj. složení, vlastnosti apod.), povolení a striktní legislativu [52].

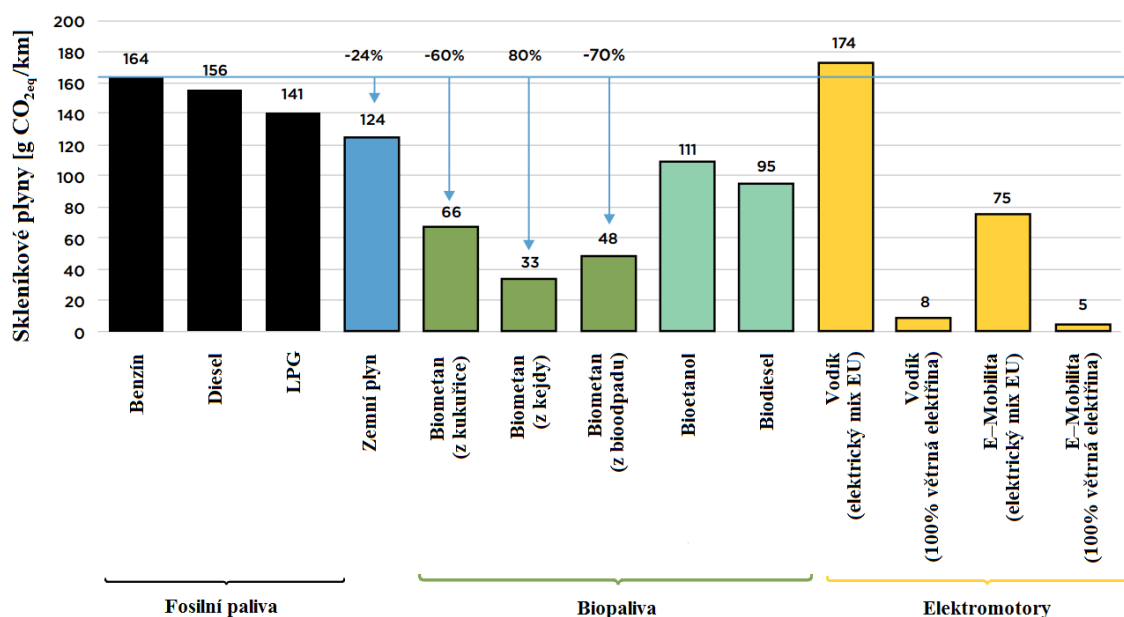
Vstřikování do sítě se provádí specializovaným vysoce nákladným procesem, jenž vyžaduje regulaci provozního tlaku plynu, zařízení na kompresi, měřidla průtoku, možnost skladování, odorizaci, mísení plynu a analýzu jeho složení. Realizace zmíněného procesu závisí na velikosti aplikovaného tlaku, množství plynu a lokaci vstupu pro injekci [52]. Na obr. 27 lze vidět systém Thyson Propane Opto Trim od společnosti Thyson Technology. Tato jednotka slouží nejen pro dodávání biometanu do plynárenské soustavy, ale i pro smíchání biometanu s propanem za účelem splnění síťových standardů [63].



obr. 27: Vstupní jednotka Thyson Propane Opto Trim pro injekci biometanu do plynárenské sítě [63]

3.7 Udržitelnost

Dopravní odvětví odpovědné za 51 % celkové spotřeby ropy se značně podílí na emisích skleníkových plynů. Bioplyn využívaný ve vozidlech jako palivo by hypoteticky mohl snížit emise o více než 50 % v porovnání s fosilními palivy. Biopalivo také podporuje nižší spotřebu fosilních paliv a zpracování odpadů, které by se jinak rozkládaly na skládkách a uvolňovaly by CH_4 do atmosféry. Mezi hlavní skleníkové plyny se typicky řadí CO_2 , CH_4 a N_2O . Níže uvedený graf 9 nabízí porovnání emisí skleníkových plynů osobního automobilu poháněného různými palivy [54].



graf 9: Porovnání emisí skleníkových plynů osobního automobilu na různé pohonné hmoty, upraveno [54]

V posouzení jsou započítány emise CO_{2eq} z výroby paliva (od dodávky surovin do BPS po upgrade bioplynu na biometan) a distribuce plynárenskou soustavou. Pro srozumitelnost a srovnání jsou výsledky hodnocení emisí skleníkových plynů vztaženy na jeden osobní automobil uvedeny v grafech CO_{2eq}. Z grafu 9 lze vyčíst patrnou redukci těchto emisí, kterou nabízí biometan, a také rozdíl emitovaného CO_{2eq} v závislosti na typu vstupní suroviny aplikované při výrobě bioplynu. Například hodnota emisí skleníkových plynů u biometanu vyráběného z plodin (kukuřice apod.) se rovná 66 g CO_{2eq}/km, přičemž více než 50% podíl je tvořen kultivací a sklizní surovin, kdy jsou aplikována hnojiva, a zušlechťování plynu představuje 28 %. Redukce emisí CO_{2eq} tedy v porovnání s benzínem může dosáhnout 60 %. Dále se emise biometanu ze statkového hnojiva vzhledem k benzínu snížili až o 80 % a difference emisí skleníkových plynů mezi benzínem a biometanem z komunálního bioodpadu čítá 70 % [54].

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce byla rešerše z oblasti výroby biometanu v bioplynových stanicích, jejíž hlavní části zkoumaly perspektivy biometanu v ČR a Evropě, principy, výhody a nevýhody technologií pro upgrade bioplynu a jejich porovnání a zhodnocení s ohledem na praktickou využitelnost v prostředí ČR.

Úvod do biometanu prezentuje jeho perspektivy v ČR a Evropě. V tuzemsku se ročně vyprodukuje přibližně 2 mil. tun BRKO, ze kterého lze zhruba vyrobit 185 mil. m³ biometanu. Aktuálně má Česko k dispozici kolem 570 BPS, z nichž polovina se nachází v blízkosti plynárenské sítě. Z tohoto hlediska je Česká republika připravena na rozmach využívání biometanu. Výrobu zeleného plynu a jeho vtlačení do distribuční soustavy zatím provozuje pouze Energetické centrum recyklace Rapotín. Podíl OZE v sektoru dopravy je stanoven EU na 14 %, pokud má být splněn, musí se biometan zařadit mezi zdroje energetického mixu. V současné době se využívá 208 CNG čerpacích stanic a 26 tisíc vozidel na plyn, do roku 2030 by se měly oba stavy přibližně zdvojnásobit. Zatím není ze strany státu poskytována žádná finanční podpora pro produkci biometanu. To by se mohlo od roku 2021 změnit, jelikož vláda ČR připravuje roční dotace v maximální výši 1 700 Kč/MWh. EU přijala nové cíle, a to snížit své emise skleníkových plynů o 55 % do roku 2030 oproti roku 1990 a přejít do poloviny století na klimatickou neutralitu. Ke splnění závazků budou zapotřebí obnovitelné plyny jako je právě biometan, který má jedny z nejnižších dopadů na životní prostředí a nenahraditelné místo v dekarbonizaci energetiky. Nicméně současný sektor biometanu je malý. Pokud mají být splněny závazky EU, musí se především výrazně rozšířit síť biometanových stanic a zajistit rozvoj využívání zeleného plynu. Odhaduje se, že potenciální produkce biometanu by mohla dosáhnout 39 mld. m³ do roku 2030 a 64,2 mld. m³ do roku 2050. Využívání vyčištěného bioplynu v oblasti dopravy jako paliva v podobě BioCNG a BioLNG podpoří jeho rozmach. Za tímto účelem se musí rozšířit stávající infrastruktura CNG a LNG čerpacích stanic v řádech několika tisíc jednotek a řady vozidel s pohonem na plyn.

Klíčová část práce charakterizovala postupy a technologie pro úpravu bioplynu na biometan. Vznik samotného biometanu předchází dvě fáze, a to čištění surového bioplynu a následně jeho upgrade na vyšší palivový standard. Bioplyn obsahuje stopová množství škodlivých látek, které mají negativní vliv na systém BPS a lidské zdraví. Z tohoto důvodu se zejména H₂S a H₂O musí odstranit již v prvním kroku úpravy, aby plyn mohl být bezpečně spalován v kogenerační jednotce nebo zušlechtěn na biometan. Samotný upgrading z bioplynu odstraňuje především CO₂, čímž dochází k nárůstu energeticky hodnotného metanu. Za tímto účelem existuje již řada metod vhodná k implementaci do praxe. Jedná se o fyzikální a chemické technologie upgradu, které jsou založené na absorpci, chemických reakcích, adsorpci, membránové a kryogenní separaci. Každá ze zmíněných metod má schopnost poskytnout biometan splňující kvalitativní požadavky pro jeho vtlačení do sítě se zemním plynem a aplikaci v dopravě jako palivo. V současné době se tyto metody potýkají s vysokými investičními a provozními náklady. Především kryogenní destilace se považuje za jednu z nejdražších metod, příčinou této skutečnosti je například vysoká spotřeba energie, která může odpovídat až 10 % vyprodukovaného biometanu. Na druhou stranu umožňuje získat velmi vysokou čistotu nejen biometanu, ale i BioCO₂, který lze dále využít v průmyslové sféře jako suchý led. Tato technologie se komerčně využívá jen ojediněle. V počáteční fázi vývoje se nachází nové biotechnologické procesy pro zušlechtování bioplynu, které lze rozdělit na

chemoautotrofní a fotoautotrofní. Tyto metody mají jednu společnou vlastnost a to, že dokážou zhodnotit oddělený CO_2 . Chemoautotrofní technologie pomocí mikroorganismů přeměňuje vodík a oxid uhličitý na metan, aby však mohla být považována za zdroj obnovitelné energie, musí se k reakci aplikovat zelený vodík získaný elektrolýzou. Fotoautotrofní metoda za působení fototrofních organismů konvertuje CO_2 na O_2 , teplo a biomasu. Kyslík lze využít k odsíření bioplynu a organická hmota se může využít jako vstupní surovina pro BPS.

Druhá hlavní část práce porovnává a hodnotí běžně používané technologie upgradu. HPWS je nejpoužívanější způsob upgradu, důvodem této skutečnosti mohou být nejnižší investiční a provozní náklady. Nevyžaduje nutně předběžné odsíření ve srovnání s ostatními technologiemi, kde se eliminace H_2S důrazně doporučuje. K zásadním nevýhodám patří vysoká spotřeba vody a energie. Technologie OPA využívá organická rozpouštědla, která jsou oproti vodě dražší a energeticky náročnější na regeneraci. HPWS a OPA mají podobné pořizovací výdaje, avšak provozně dražší je tedy druhá zmíněná metoda. K nejnákladnějším způsobům čištění bioplynu se řadí CSP následovaná PSA. Důvodem vysokých nákladů chemického čištění může být cena a velká spotřeba absorbentu a tepelné energie při jeho regeneraci. Aplikovaná rozpouštědla mohou být pro člověka toxická. Na druhou stranu CSP umožňuje získat nejčistší biometan s nejnižšími ztrátami CH_4 během procesu oproti ostatním technologiím. O trochu vyšší úniky metanu vykazuje MS a HPWS, zatímco u OPA a PSA mohou být nejvyšší. Poslední čtyři jmenované technologie produkují biometan se srovnatelnou kvalitou. U techniky PSA se do výše celkových nákladů promítá zejména cena použitého adsorbentu a počet adsorpčních kolon, který tradičně odpovídá čtyřem a zajišťuje tak kontinuální provoz. Kapitálové náklady membránové separace jsou spíše vysoké a srovnatelné s technikou CSP, naopak se jedná o provozně levnější proces než OPA. Separace pomocí MS může být energeticky nenáročná, to ovšem závisí například na typu použité membrány a provozním tlaku. K dosažení požadované kvality biometanu je zapotřebí vícestupňový systém membrán. V současné době tuto metodu omezují praktické zkušenosti.

Biometan je obnovitelnou a plnohodnotnou alternativou fosilního zemního plynu. Lze jej vyrábět kontinuálně a nezávisle na počasí. Může výrazně přispívat ke snižování emisí skleníkových plynů a zlepšení stavu životního prostředí. Avšak v oblasti upgradu bioplynu stále existuje prostor pro výzkum a vývoj. Soudobé technologie si vzájemně konkurují z různých aspektů a jejich rozvoj závisí zejména na snížení investičních a provozních nákladů, díky kterým by se biometan mohl stát více konkurenceschopný se zemním plynem.

Seznam použité literatury

- [1] AL SEADI, Teodorita, Dominik RUTZ, Heinz PRASSL, Michael KÖTTNER, Tobias FINSTERWALDER, Silke VOLK a Rainer JANSSEN. *Biogas HANDBOOK* [online]. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, 2008 [cit. 2020-11-08]. ISBN 978-87-992962-0-0. Dostupné z: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>
- [2] BRÉMOND, Ulysse, Aude BERTRANDIAS, Jean-Philippe STEYER, Nicolas BERNET a Hélène CARRERE. A vision of European biogas sector development towards 2030: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, **287** [cit. 2021-03-12]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.125065
- [3] SCARLAT, Nicolae, Jean-François DALLEMAND a Fernando FAHL. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* [online]. 2018, **129**, 457-472 [cit. 2021-4-30]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2018.03.006
- [4] Letošní Evropská bioplynová konference asociace EBA potvrdila potenciál role biometanu v Zelené dohodě. *CZ Biom* [online]. 1. 10. 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/letosni-evropska-bioplynova-konference-asociace-eba-potvrdila-potencial-role-biometanu-v-zelene-dohode>
- [5] PRUSSI, M., A. JULEA, L. LONZA a C. THIEL. Biomethane as alternative fuel for the EU road sector: analysis of existing and planned infrastructure. *Energy Strategy Reviews* [online]. 2021, **33** [cit. 2021-03-16]. ISSN 2211467X. Dostupné z: doi:10.1016/j.esr.2020.100612
- [6] *BIOM: Biometan: Biozemní plyn* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-4-18]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://czbiom.cz/wp-content/uploads/casopis_Biom_2017_04-WEB.pdf
- [7] SUN, Qie, Hailong LI, Jinying YAN, Longcheng LIU, Zhixin YU a Xinhai YU. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, 51, 521-532 [cit. 2021-03-17]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.06.029
- [8] BAČÍK, Ondřej. Bioplynové stanice: technologie celonárodního významu. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 14. 1. 2008 [cit. 2021-01-14]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynovy-technologie-celonarodniho-vyznamu>
- [9] VÁŇA, Jaroslav. Bioplynové stanice na využití bioodpadů. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 10. 5. 2010 [cit. 2021-01-14]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynovy-technologie-na-vyuziti-bioodpadu>
- [10] FUKSA, Pavel. Netradiční využití biomasy v praxi. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 15. 7. 2009 [cit. 2021-01-16]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/netradicni-vyuziti-biomasy-v-praxi>

- [11] CZ BIOM. Dostatek kvalitních vstupních surovin pro výrobu bioplynu. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 11. 9. 2015 [cit. 2021-01-17]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/dostatek-kvalitnich-vstupnich-surovin-pro-vyrobu-bioplynu>
- [12] *BIOM: Bioodpady a jejich využití* [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-01-29]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/casopis_biom_2015_02_v2_web.pdf
- [13] ŠKRDLÍKOVÁ, Helena. Zemědělské bioplynové stanice konečně mohou přijímat ke zpracování i bioodpady. *Zajimej.se* [online]. 26. 5. 2020 [cit. 2021-01-30]. Dostupné z: https://zajimej.se/zemedelske-bioplynove-stanice-konecne-mohou-prijimat-ke-zpracovani-i-bioodpady/?utm_source=ecomail&utm_campaign=2020_05_28_newsletter_zajimej.se&utm_medium=email&utm_term=14605&ecmid=10611
- [14] MATĚJKA, Jan, Miroslav KAJAN, Luboš NOBILIS a Tomáš ROSENBERG,. *Studie využití bioplynu pro energetickou bezpečnost a rozvoj obcí a mikroregionů - úvod pro metodiku* [online]. 2014 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/Studie%20-%20BioReg.pdf>
- [15] CZ BIOM – ČESKÉ SDRUŽENÍ PRO BIOMASU. *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. CZ Biom – České sdružení pro biomasu, 2009 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/pruvodce_vyrobu_vyuzitim_bioplynu.pdf
- [16] Technology: Anaerobic Digestion. *Energy Works* [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <http://energyworkshull.co.uk/technology/>
- [17] GARAFFA, Christian a Klaus GRÖLL. Anaerobic Digestion Of Compostable Bags. *BioCycle* [online]. 25. 10. 2013, **54**(10) [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.biocycle.net/anaerobic-digestion-of-compostable-bags/>
- [18] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Evžen PŘIBYL. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství* [online]. Praha, 2007 [cit. 2021-01-21]. ISBN 978-80-86884-28-8. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/086.PDF>
- [19] ZAFAR, Salman. Types of Biogas Storage Systems. *BioEnergy Consult* [online]. 22. 7. 2020 [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: <https://www.bioenergyconsult.com/biogas-storage/>
- [20] Cogeneration Systems: Cogeneration Mechanism and Merits. *YANMAR* [online]. [cit. 2021-01-28]. Dostupné z: https://www.yanmar.com/global/energy/cogeneration_systems/

- [21] CZ BIOM. Volba vhodné kogenerační jednotky na bioplyn. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 11. 9. 2015 [cit. 2021-01-21]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/volba-vhodne-kogeneracni-jednotky-na-bioplyn>
- [22] KAJAN, Miroslav a Richard LHOTSKÝ. *Možnosti zvýšení produkce bioplynu na stávajících zařízeních* [online]. Listopad 2006 [cit. 2021-01-21]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf>
- [23] *BIOM: Digestát pokaždé jinak* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-01-23]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://czbiom.cz/wp-content/uploads/2020_01_WEB.pdf
- [24] FUKSA, Pavel. Vliv organizace porostu silážní kukuřice na produkci bioplynu. *Agromanuál* [online]. 13. 09. 2018 [cit. 2021-01-23]. ISSN 1801-4895. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/vliv-organizace-porostu-silazni-kukurice-na-produkci-bioplynu>
- [25] CZ BIOM. Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 11. 9. 2015 [cit. 2021-01-23]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>
- [26] PAVLÍČEK, Petr. *Ekonomická efektivnost výroby biometanu*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Jaroslav Knápek.
- [27] ANGELIDAKI, Irini, Laura TREU, Panagiotis TSAPEKOS, Gang LUO, Stefano CAMPANARO, Henrik WENZEL a Panagiotis G. KOUGIAS. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances* [online]. 2018, **36**(2), 452-466 [cit. 2021-02-20]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2018.01.011
- [28] Biometan jako palivo budoucnosti? *Česká bioplynová asociace* [online]. České Budějovice, 29. 10. 2014 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/aktuality/biometan-jako-palivo-budoucnosti.html>
- [29] TRNAVSKÝ, Jiří. Rozjíždí se výroba biometanu z odpadů. *Energie 21* [online]. 8. 10. 2019 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.energie21.cz/v-cesku-zacina-vyroba-biometanu-z-odpadu/>
- [30] About biogas and biomethane. *EBA – European Biogas Association* [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.europeanbiogas.eu/about-biogas-and-biomethane/>
- [31] ESPOSITO, Elisa, Loredana DELLAMUZIA, Ugo MORETTI, Alessio FUOCO, Lidietta GIORNO a Johannes C. JANSSEN. Simultaneous production of biomethane and food grade CO₂ from biogas: an industrial case study. *Energy & Environmental Science* [online]. 2019, **12**(1), 281-289 [cit. 2021-04-16]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/C8EE02897D

- [32] Firma: Z odpadu lze v ČR získat kolem 185 mil. m³ biometanu ročně. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 27. 12. 2020 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/firma-z-odpadu-lze-v-cr-ziskat-kolem-185-mil.m3-biometanu-rocne>
- [33] SIROVÁ, Barbora a Ondřej FÉR. Výroba biometanu podle kritérií udržitelnosti. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 28. 11. 2020 [cit. 2021-02-08]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyroba-biometanu-podle-kriterii-udrizitelnosti>
- [34] Biometan nahradí 40 % zemního plynu v dopravě. Zástupci čisté energetiky komentují novou studii. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 25. 6. 2020 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/biometan-nahradi-40-zemniho-plynu-v-doprave.zastupci-ciste-energetiky-komentuji-novou-studii>
- [35] SOUČEK, Ondřej. Na Karvinsku má vyrůst teprve druhá výroba biometanu v Česku. *E15* [online]. 16. 4. 2020 [cit. 2021-02-07]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/na-karvinsku-ma-vyrust-teprve-druha-vyroba-biometanu-v-cesku-1368720>
- [36] MORAVEC, Adam. Začátek „doby biometanové“ v České republice. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 6. 12. 2019 [cit. 2021-02-08]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zacatek-doby-biometanove-v-ceske-republice>
- [37] Biometan má zelenou! *Energy financial group* [online]. Praha, 28. 8. 2020 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://www.efg-holding.cz/biometan-ma-zelenou/>
- [38] EFG na Dnu plynové mobility mluvilo o budoucnosti BioCNG z odpadu. *CZ Biom* [online]. 17. 9. 2020 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/efg-na-dnu-plynove-mobility-mluvilo-o-budoucnosti-biocng-z-odpadu>
- [39] Biometan nahradí 40 % zemního plynu v dopravě. Zástupci čisté energetiky komentují novou studii. *CZ Biom* [online]. 25. 6. 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/zpravy-z-tisku/biometan-nahradi-40-zemniho-plynu-v-doprave.zastupci-ciste-energetiky-komentuji-novou-studii>
- [40] SOUČEK, Ondřej. Stát podpoří výrobu biometanu miliardami korun. *E15* [online]. 10. 1. 2019 [cit. 2021-04-09]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/stat-podpori-vyrobu-biometanu-miliardami-korun-1355265>
- [41] SCHIMMEL, Matthias, Daan PETERS a Kees VAN DER LEUN. *Setting a binding target for 11% renewable gas* [online]. Leden 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/01/20210122_FINAL_policy_proposal_designed.pdf

- [42] NGUYEN, Luong N., Jeevan KUMAR, Minh T. VU, et al. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. *Science of The Total Environment* [online]. 2021, **765** [cit. 2021-02-25]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142753
- [43] *European Biogas Association – Annual report 2020* [online]. 2021 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2021/01/Annual-Report-2020-new.pdf>
- [44] *The European Green Deal In the Fast Lane with Biomethane in Transport* [online]. Brusel, 15. 6. 2020 [cit. 2021-02-13]. Dostupné z: https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/06/Press-Release_EBA_NGVA_In-the-Fast-Lane-with-Biomethane-in-Transport.pdf
- [45] YANG, Liangcheng, Xumeng GE, Caixia WAN, Fei YU a Yebo LI. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014, **40**, 1133-1152 [cit. 2021-02-20]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2014.08.008
- [46] ULLAH KHAN, Imran, Mohd HAFIZ DZARFAN OTHMAN, Haslenda HASHIM, Takeshi MATSUURA, A.F. ISMAIL, M. REZAEI-DASHTARZHANDI a I. WAN AZELEE. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management* [online]. 2017, **150**, 277-294 [cit. 2021-02-19]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2017.08.035
- [47] RYCKEBOSCH, E., M. DROUILLON a H. VERVAEREN. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2011, **35**(5), 1633-1645 [cit. 2021-02-20]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2011.02.033
- [48] MWACHARO, Fiona, Juraj BHANDARI, Ahmed OTHMAN, a Anne-Riikka RAUTIO. *Biogas drying and purification methods* [online]. Kokkola, 2020 [cit. 2021-02-20]. ISBN 978-952-7173-55-8. Dostupné z: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/356234/978-952-7173-55-8.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [49] Extruded Activated Carbon Pellets for H₂S Removal From Biogas. *KEHUAYUAN Activated Carbon* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <http://www.activatedcarbonpellets.com/sale-11766285-extruded-activated-carbon-pellets-for-h2s-removal-from-biogas.html>
- [50] VIKRANT, Kumar, Suresh Kumar KAILASA, Daniel C.W. TSANG, Sang Soo LEE, Pawan KUMAR, Balendu Shekhar GIRI, Ram Sharan SINGH a Ki-Hyun KIM. Biofiltration of hydrogen sulfide: Trends and challenges. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **187**, 131-147 [cit. 2021-02-23]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.188

- [51] LE BORGNE a BAQUERIZO. Microbial Ecology of Biofiltration Units Used for the Desulfurization of Biogas. *ChemEngineering* [online]. 2019, **3**(3) [cit. 2021-02-23]. ISSN 2305-7084. Dostupné z: doi:10.3390/chemengineering3030072
- [52] KAPOOR, Rimika, Pooja GHOSH, Bhawna TYAGI, et al. Advances in biogas valorization and utilization systems: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, **273** [cit. 2021-02-25]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2020.123052
- [53] CHEN, Xiao Yuan, Hoang VINH-THANG, Antonio Avalos RAMIREZ, Denis RODRIGUE a Serge KALIAGUINE. Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. *RSC Advances* [online]. 2015, **5**(31), 24399-24448 [cit. 2021-02-25]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C5RA00666J
- [54] BOSHELL, Francisco, Angela CLINKSCALES, Jens GIERSDORF, Dolf GIELEN a Arthur WELLINGER. *IRENA: Biogas for road vehicles: Technology brief*[online]. 2017. 2017 [cit. 2021-03-03]. ISBN 978-92-9260-002-0. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief>
- [55] BEIL, Michael a Uwe HOFFSTEDE. *Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems* [online]. 13. 9. 2010 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: https://biogasmax.co.uk/media/d3_5_iwes_biogasmax_v2_rev_nov2010__068764100_1109_10022011.pdf
- [56] Gas membrane separation. *MemBrain* [online]. Stráž pod Ralskem [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.membrain.cz/en/gas-membrane-separation.html>
- [57] Waste recovery. *Air Liquide* [online]. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z: <https://energies.airliquide.com/energies/waste-recovery>
- [58] ADNAN, Amir Izzuddin, Mei Yin ONG, Saifuddin NOMANBHAY, Kit Wayne CHEW a Pau Loke SHOW. Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Bioengineering* [online]. 2019, **6**(4) [cit. 2021-03-02]. ISSN 2306-5354. Dostupné z: doi:10.3390/bioengineering6040092
- [59] KOUGIAS, Panagiotis G., Laura TREU, Daniela Peñailillo BENAVENTE, Kanokwan BOE, Stefano CAMPANARO a Irini ANGELIDAKI. Ex-situ biogas upgrading and enhancement in different reactor systems. *Bioresource Technology* [online]. 2017, **225**, 429-437 [cit. 2021-03-21]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2016.11.124
- [60] MEIER, L., R. PÉREZ, L. AZÓCAR, M. RIVAS a D. JEISON. Photosynthetic CO₂ uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2015, **73**, 102-109 [cit. 2021-03-25]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2014.10.032

[61] TOLEDO-CERVANTES, Alma, Mayara L. SEREJO, Saúl BLANCO, Rebeca PÉREZ, Raquel LEBRERO a Raúl MUÑOZ. Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: Boosting nutrient recovery via biomass productivity control. *Algal Research* [online]. 2016, **17**, 46-52 [cit. 2021-03-25]. ISSN 22119264. Dostupné z: doi:10.1016/j.algal.2016.04.017

[62] Volvo V70 Bi-Fuel. *Volvo Cars* [online]. 22. 3. 2006 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/photos/9814>

[63] Biomethane Gas to Grid. *Thyson Technology* [online]. Ellesmere Port [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.thyson.com/products-and-solutions/analytical-engineering/biomethane-gas-to-grid/>

Seznam použitých zkratek a symbolů

AMDEA	aktivovaný methyldiethanolamin
AS	Aminová vypírka (Amine Scrubbing)
BPS	bioplynová stanice
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
BRO	biologicky rozložitelný odpad
CA	acetát celulózy
CMS	uhlíkové molekulární síto (Carbon molecular sieve)
CSP	Chemický proces čištění (Chemical scrubbing process)
ČR	Česká republika
ESA	Electrical swing adsorption
EU	Evropská unie
HPWS	Vysokotlaká vodní vypírka (High Pressure Water Scrubbing)
ISS	Inorganic solvent scrubbing
MDEA	methyldiethanolamin
MMM	smíšené matricové membrány (Mixed matrix membrane)
MOF	kovově–organické rámce (Metal–organic frameworks)
MS	Membránová separace
OPA	Fyzikální absorpce organickými rozpouštědly (Organic Physical Absorption)
OZE	obnovitelné zdroje energie
PEG	polyethylenglykol
PI	polyimid
PSA	Adsorpce kolísáním tlaku (Pressure Swing Adsorption)
TSA	Adsorpce kolísáním teploty (Temperature swing adsorption)

Seznam obrázků

obr. 1: Typická zemědělská bioplynová stanice [14]	10
obr. 2: Hlavní komponenty, stavební seskupení a agregáty jednostupňové zemědělské bioplynové stanice s hygienizační jednotkou, upraveno [15]	11
obr. 3: Postupy dávkování sytké biomasy, upraveno [15]	12
obr. 4: Vertikální fermentor, upraveno [16]	13
obr. 5: Horizontální fermentor, upraveno [17]	13
obr. 6: Lopatkové míchadlo (vlevo), ponorné míchadlo (vpravo), upraveno [1]	14
obr. 7: Nízkotlaký samostatný plynojem, upraveno [19]	15
obr. 8: Kogenerace, upraveno [20]	15
obr. 9: Farmy Bedfordia – Aplikace digestátu [23]	17
obr. 10: Udržitelný cyklus anaerobní fermentace se současnou výrobou biometanu a potravinářského BioCO ₂ , upraveno [31]	19
obr. 11: Kontejner s technologií membránové separace – v popředí filtry s aktivním uhlím [36]	21
obr. 12: Extrudované pelety s aktivním uhlím pro odstraňování H ₂ S z bioplynu [49] ...	28
obr. 13: Schematické znázornění interakce probíhající v biofiltrech, upraveno [51]	29
obr. 14: Soudobé technologie pro upgrade bioplynu, upraveno [53]	30
obr. 15: Schéma technologie HPWS, upraveno [54]	31
obr. 16: Schéma technologie OPA, upraveno [55]	32

obr. 17: Schéma technologie AS, upraveno [55]	33
obr. 18: Základní princip PSA, upraveno [42]	34
obr. 19: Schéma technologie PSA, upraveno [54]	35
obr. 20: Základní princip membrány, upraveno [56]	36
obr. 21: Fyzikální a technický princip membránové separace, upraveno [42]	37
obr. 22: Modul pro upgrade bioplynu – provozní princip, upraveno [57]	38
obr. 23: Schéma kryogenní destilace, upraveno [58]	39
obr. 24: Schéma chemoautotrofní technologie, upraveno [27]	41
obr. 25: Schéma fotoautotrofní technologie, upraveno [61]	42
obr. 26: Automobil s duálním palivovým systémem, upraveno [62]	49
obr. 27: Vstupní jednotka Thyson Propane Opto Trim pro injekci biometanu do plynárenské sítě [63]	50

Seznam grafů

graf 1: Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR 2009–2018 [33]	20
graf 2: 11% cíl pro obnovitelné plyny do roku 2030, upraveno [41]	23
graf 3: Vývoj biometanových stanic v Evropě v letech 2011–2019, upraveno [43]	23
graf 4: Podíl surovin v optimalizovaném scénáři produkce biometanu v EU v roce 2050, upraveno [2]	24
graf 5: Odhadované kapitálové náklady různých technologií s kapacitou 1000 Nm ³ /h [42]	43
graf 6: Odhadované celkové provozní náklady pro různé technologie s průtokem 1000 Nm ³ /h [42]	44
graf 7: Provozní náklady v závislosti na spotřebě energie různých technologií [7]	45
graf 8: Spotřeba energie na jednotku objemu plynu jednotlivých technologií [46]	45
graf 9: Porovnání emisí skleníkových plynů osobního automobilu na různé pohonné hmoty, upraveno [54]	51

Seznam tabulek

tab. 1: Průměrné složení bioplynu, upraveno [15]	16
tab. 2: Nečistoty bioplynu a jeho účinky, upraveno [46]	26
tab. 3: Výhody a nevýhody komerčních technologií pro upgrade bioplynu	47